



Terminalstrategier för skogsflis på Södra Skogsenergi

Terminal strategies for wood chips at Södra Skogsenergi

Victor Asmoarp

Arbetsrapport 399 2013
Examensarbete 30hp D
Jägmästarprogrammet

Handledare:
Dimitris Athanassiadis

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
901 83 UMEÅ
www.slu.se/srh
Tfn: 090-786 81 00



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-399-SE

Terminalstrategier för skogsflis på Södra Skogsenergi

Terminal strategies for wood chips at Södra Skogsenergi

Victor Asmoarp

Examensarbete i Skogshushållning vid institutionen för skoglig resurshushållning, 30 hp
Jägmästarprogrammet
EX0707

Handledare: Dimitris Athanassiadis, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, teknologi

Extern handledare: Sofia Persson, Södra Skogsenergi

Extern handledare: Mikael Frisk, Skogforsk

Examinator: Dag Fjeld, SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning, teknologi

Sammanfattning

Skogsbränsle är en viktig del av Sveriges energiförsörjning i och med det högt uppsatta målen som finns på förnyelsebar energi. För att skogsflis ska kunna konkurrera med andra energislag krävs en effektiv försörjningskedja från skog till mottagare. För Södra Skogsenergi är terminaler en viktig buffert i försörjningskedjan för att klara av den höga efterfrågan av skogsflis som råder under vintern. Men terminaler är dyra och medför risker och Södra Skogsenergi vill därför minimera den volym som måste lagras på terminal.

Syftet med detta examensarbete är att skapa ett underlag för hur terminaler ska användas och placeras i logistikkedjan för skogsflis med avseende på terminalantal och andel av årsvolym att lagra på terminal. Genom optimering av fyra olika försörjningskedjor med olika antal terminaler har problemställningen analyserats. De fyra scenarierna var; referensscenario med Södras terminaler från 2012, och tre scenarier med 10, 20 och 30 systematiskt utplacerade terminaler. I modellen användes 664 tillgångsnoder, 78 mottagare och två sönderdelningssystem. Planperioden var tre bränslesäsonger á 12 månader och alla förutsättningar hämtades från Södra Skogsenergis verksamhet.

Resultatet blev att ca 200 000 m³s dvs. 11 % av årsvolymen måste lagras på terminal för att Södra Skogsenergi ska klara av en säker försörjning. Antalet terminaler i försörjningskedjan hade liten påverkan på transportekonomi och medeltransportavstånd. Resultatet visade att det både var ekonomiskt och mest transporteffektivt att placera terminaler i områden utan mottagare och där det var god tillgång på råvara. Referensscenariot hade ett medeltransportavstånd på 42 km vilket var 25 % kortare än i verkligheten.

Nyckelord: Skogsbränsle, terminaler, flödesoptimering, lager, försörjningskedja

Summary

As a part of the EU environmental goals, Sweden has to increase the supply from renewable sources where forest fuel composes an important part. To compete with other forms of energy sources, forest fuel needs to have an efficient supply chain from the forest to the receiver. For Södra Skogsenergi, an inventory of wood chips stored at terminals is an important part of the supply chain for managing the high demand for wood chips during the winter. Terminals are expensive and involve risks, therefore the volume of wood chips stored at terminals needs to be minimized. In 2012 Södra Skogsenergi used 22 terminals for storage of wood chips, these terminals stored 20 % of the annual volume.

The purpose of this report is to provide decision support for how terminals could be used in the wood chips logistics chain considering the number of terminals and proportion of annual volume needed to be stored. The method used was an optimization of four scenarios with different numbers of terminals. The first scenario was a reference scenario with Södra Skogsenergis terminals from 2012 while the remaining three scenarios had 10, 20 and 30 systematically located terminals. An LP-problem model called FlowOpt was used to maximize the profit for each scenario. In the model 664 supply points were used, 78 receivers and two chipping systems. The planning period was three years with an interval of 12 months. All settings were gathered from Södra Skogsenergi.

The results indicate that 200 000 m³ loose (11 % of the annual volume) had to be stored at the terminals to secure Södra Skogsenergi's supply. The results show that the number of terminals has low impact on the mean transport distance and transport cost. Furthermore the catchment area of a terminal shrinks with increasing number of terminals. The shortest transportation distance occurred in the reference scenario with Södra Skogsenergi's existing terminal structure. The result shows that the most economical and efficient solution is to locate terminals in areas without a receiver and with a good supply of forest residues. The average transport distance in the reference scenario was 42 km which was 25 % shorter than in reality.

Keyword: Forest fuel, terminals, flow optimization, inventory, supply chain

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	1
Summary.....	2
1 Inledning.....	5
1.1 Bakgrund	5
1.1.1 Biobränsle.....	5
1.1.3 Sönderdelning	6
1.1.4 Transport.....	7
1.1.5 Terminaler	8
1.1.6 Södra Skogsenergi	9
1.1.7 Skogsflisens försörjningskedja	10
1.1.8 FlowOpt.....	11
1.2 Tidigare studier.....	12
1.3 Syfte.....	13
1.4 Mål.....	14
2 Material och Metod	15
2.1 Material.....	15
2.1.1 Geografisk information	15
2.1.2 Tillgångsnoder	15
2.1.3 Produktionsenheter	16
2.1.4 Transport.....	17
2.1.5 Terminaler	17
2.1.6 Mottagningsplatser	18
2.2 Metod.....	20
2.2.1 Optimeringsmodellen	20
2.2.2 Terminalandel.....	24
2.2.3 Terminalstruktur	25
2.2.4 Upptagningsområden.....	27
2.2.5 Verifiering	28
2.3 Avgränsningar	28
3 Resultat	29
3.1 Optimeringsresultat	29
3.2 Terminalandel	32
3.3 Terminalstruktur	33

3.4 Upptagningsområde.....	33
3.5 Verifiering	36
4 Diskussion	38
4.1 Modellen.....	38
4.2 Resultat	39
4.2.1 Terminalandel.....	39
4.2.2 Terminalstruktur	40
4.2.3 Upptagningsområde.....	41
4.3 Jämförelse med tidigare studier	41
4.4 Fortsatta studier	42
4.5 Slutsatser.....	43
Tillkännagivande	43
Referenslista	44
Bilaga A FlowOpt formler.....	I

1 Inledning

1.1 Bakgrund

1.1.1 Biobränsle

EU antog 2008 ett miljömål som kallas 20/20/20-målet. Miljömålet innebär att år 2020 ska det i Europa ha skett en minskning av växthusgaser med 20 %, en energieffektivisering med 20 % och att 20 % av den tillförda energin ska komma från förnyelsebara energikällor (Energimyndigheten, 2012). För Sveriges del innebär detta att 49 % av den tillförda energin ska komma från förnyelsebara energikällor (Energimyndigheten, 2013) där biobränsle kommer bli en viktig del. 2010 hade Sverige en energiförbrukning på 616 TWh varav drygt 20 % kom från biobränsle (Skogsstyrelsen, 2012). Av biobränslet användes 34 % till fjärrvärme och 40 % inom industrin, resterande del bidrog främst till elproduktion.

Biobränsle (figur 1) är samlingsnamnet för allt bränsle som härstammar från biologiskt material (Egnell, 2009). Till gruppen biobränsle hör trädbränsle som är träd eller delar av träd som inte genomgått någon kemisk omvandling. Skogsbränsle är trädbränslen som inte tidigare haft någon annan användning som grenar och toppar (grot), stamved, stubbar och biprodukter från industrin (Egnell, 2009). Grot, träddeklar och stubbar tillhör primära skogsbränslen (Egnell, 2009) som är en viktig källa till energi och har potential till ett ökat uttag från skogen (Enström et al., 2010). Träddelsuttag i klenare gallringar eller bestånd med eftersatt röjningsbehov är en potentiell källa till skogsbränsle för framtiden, det bedöms att det finns 2,8 miljoner ha ungskog i Sverige som kan gallras med tillvaratagande av skogsbränsle (Nordfjell & Wide, 2010).

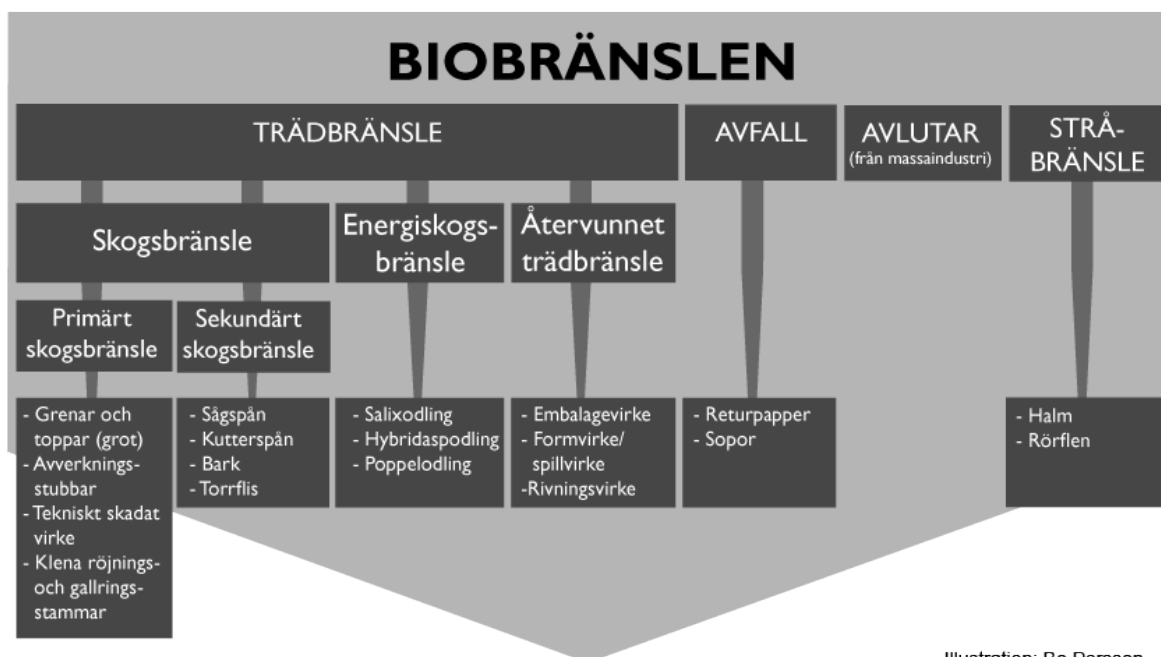


Illustration: Bo Persson

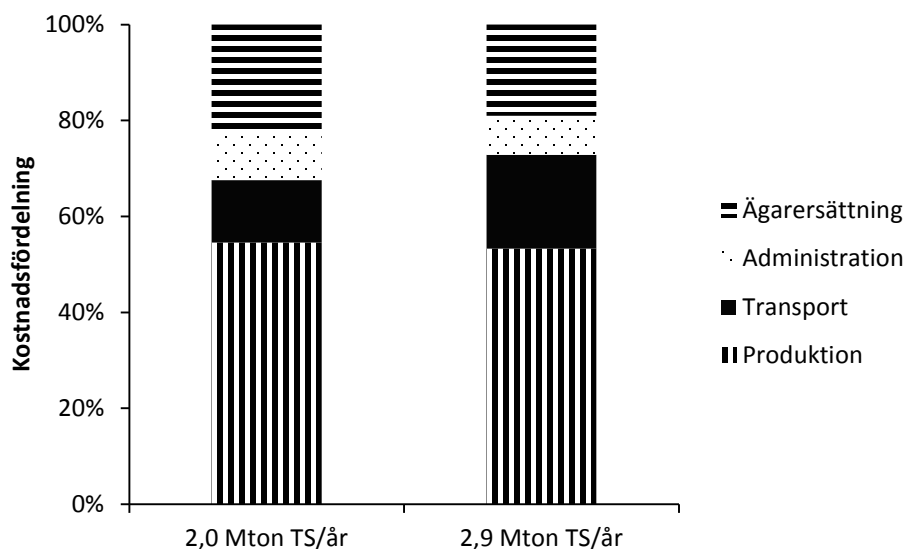
Figur 1. Definition av biobränslen enligt Egnell (2009).

Figure 1. Definition of biofuels according to Egnell (2009).

Skogsbränslemarknaden befinner sig i en stark tillväxtfas med ökande efterfråga på råvara från svenska skogar (Nalin, 2008). Hälften av Sveriges produktiva skogsmarksareal ägs av privata markägare, en fjärdedel ägs av skogsbolag och resten ägs av staten eller annan allmän ägare (Skogsstyrelsen, 2012). De aktörer som köper upp råvaran från skogsägarna är skogsägarföreningar, energibolag och skogsindustrier (Nalin, 2008). De aktörer som är slutkonsumenter av råvaran är värmeverk, villamarknaden, energikrävande industrier och industrier som använder biomassa som råvara (Nalin, 2008). Den import och export av biobränsle som sker används till största del för att jämna ut behovet på den inhemska marknaden (Nalin, 2008). Skogsbränslemarknaden anses vara en fungerande marknad där parterna arbetar med långa kundrelationer (Nalin, 2008).

Skogsbränslen anses ofta vara en lokal råvara som är känslig för långa transportavstånd och beroende av en billig produktionskostnad för att klara av att konkurrera med bränslen på den globala marknaden (Asikainen, 2000). Vid framtagning av skogsbränsle är energiåtgången för produktion och transport 3-5 % av energiinnehållet i det färdiga materialet (Björheden, 2010a). Snittpriset för skogsflis vid grinden hos mottagare var för värmeverk och industri 214 respektive 198 kr/MWh i Sverige 2011 (Skogsstyrelsen, 2012).

Marginalkostnaden för skogsflis är i intervallet 770 – 920 kr/ton TS enligt Athanassiadis et al. (2009). I rapporten har marginalkostnaden beräknats för skogsflis vid olika uttagsmängder av råvara. I figur 2 visas proportionerna av kostnader för uttag, sönderdelning och transport vid dagens uttagsmängd på 2,0 Mton TS/år och hur marginalkostnaden ändras vid en uttagsmängd på 2,9 Mton TS/år som är 90 % av den tillgängliga potentialen.



Figur 2. Fördelning av kostnader för skogsflis vid en uttagsmängd på 2,0 respektive 2,9 Mton TS/år enligt en undersökning av Athanassiadis et al. (2009).

Figure 2. Proportion of cost items for wood chips production at a harvest level of 2,0 and 2,9 Mton TS / year according to a survey of Athanassiadis et al. (2009).

1.1.3 Sönderdelning

För hantering av avverkningsrester och träddeklar används fyra olika metoder; terrängflisning, avläggsflisning, lösgrot och buntning (Junginger et al., 2005) varav de två

sistnämnda innebär flisning på terminal eller vid industri. Flisning på avlägg är den dominerande metoden och står för 80 % av volymen, 10 % flisas i terrängen och resterande 10 % transporteras oflisad med grotbil eller i buntad form till terminal eller slutkonsument (Andersson, 2000). Flisning i terräng sker med skotarmonterade flishuggar som tappar flisen i en container eller på marken (Eliasson, 2010). Vid flisning på avlägg skotas groten från hygget till avlägget där det läggs i en vält som antingen täcks eller ligger öppen för att påskynda torkningsprocessen. Normalt lagras groten i vält över en sommar innan den flisas (Nilsson, 2007). Vid flisning på avlägg ökar antalet möjliga sönderdelningssystem, Eliasson (2010) menar att skotarmonterade flishuggar är vanligast medan lastbilshuggar är på uppgång, vid riktigt stora avlägg kan mobila krossar användas för sönderdelning vilket ökar effektiviteten. Fördelen med skotarmonterade flishuggar är att de inte är beroende av att vältan ska ligga i direkt anslutning till skogsbilvägen. Lastbilshuggar är däremot väldigt kostnadseffektiva på mindre avlägg och förutsätter att vältan ligger tillgänglig från skogsbilväg men förlorar sin effektivitet på långa transportavstånd (Eliasson, 2010).

Marginalkostnaden för skotning, flisning och maskinflytt för skogsflis är i intervallet 420 – 490 kr/ton TS (72 – 84 kr/m³s) enligt Athanassiadis et al. (2009) och är i figur 2 sammanslaget i produktionskostnad. Sönderdelning på hygget är aldrig lönsamt utan bör endast göras om det finns andra tvingande skäl än ekonomiska (Björheden, 2010b). System med flisning på avlägg i form av skotarmonterad flishugg, kross eller maskinsystem med flyttkostnad är endast lönsamt på medelstora till stora avlägg och transportavstånd på mer än 100 km. System utan flyttkostnad så som lastbilshuggar och grotbilar är lönsamma på de flesta typer av avlägg men främst små avlägg och korta transportavstånd (Björheden, 2010b). Mellan 1983 och 2003 sjönk flisningskostnaden med 33 % och skotningskostnaden sjönk med 58 % (Junginger et al., 2005).

1.1.4 Transport

Som figur 2 visar, motsvarar transporten av skogsbränsle den näst största kostnaden för skogsflis och är därför viktig att minska ur ett konkurrensperspektiv. Transport av grot och träddeklar kan i oflisad form ske med grotbilar (lastbilar med täckta sidor) eller i buntad form på timmerbilar med nätsidor. Flistransport från skogen sker med containerbil á tre containrar på varje lastbil med en lastkapacitet på 35 m³s per container (Andersson, 2000), i varje system används nio containrar efter en skotarmonterad flisare. Transport från terminal till slutkonsument sker i stor utsträckning med sidotippande flisbilar som är vanliga för transport av cellulosafelis (Andersson, 2000).

Transportkostnaden står för 20-25 % av den totala kostnaden för skogsbränsle (Gunnarsson et al., 2001). Transportkostnaden har sjunkit med 15 % från 1983 till 2003 enligt Junginger et al. (2005). Enligt Björheden (2010b) är lösgrots- och huggbilssystem konkurrenskraftiga på transportavstånd upp till 100 km. Nackdelen med att transportera lösgrot är den låga lastvikten på grotbilar jämfört med andra transportslag, vilket gör lösgrotssystemet känsligt för långa transportavstånd (Eliasson, 2010). Brytpunkten för när det blir lönsamt att transportera skogsflis på järnväg är vid ca 130 km förutsatt att transportavståndet till tågterminal inte är längre än 50 km (Engblom, 2007).

Medeltransportavståndet för skogsbränsle är 60 – 75 km från skog till slutanvändare (Andersson, 2000). Andersson (2000) menar att det är viktigt att förfinas dagens teknik för hantering av skogsbränsle, men framför allt logistiken kring försörjningskedjan för att skogsbränslet ska ha fortsatt konkurrenskraft mot andra bränslen.

1.1.5 Terminaler

Vid en inventering av biobränsleterminaler i Sverige, gjord av Skogsbrukets Data Central (SDC) fann man att det fanns ungefär 250 terminaler som användes för lagring, sönderdelning eller omlastning av skogsbränsle (Eriksson, 2012). Lagringsbehovet uppstår på grund av produktionsförmågan under året inte stämmer överens med den säsongsvisa efterfrågan på skogsbränsle (Flisberg et al., 2012b; Gunnarsson et al., 2004). Engblom (2007) menar på att det ur ett kostnadsperspektiv inte är lönsamt att lasta om material på terminal vid kortare transportavstånd. Genom att använda mobila krossar på terminal kan produktionskostnaden reduceras gentemot flisning på avlägg, däremot så höjs transportkostnaden eftersom groten måste transporteras hel till terminalen (Söderström, 2006). Den minskade produktionskostnaden väger inte upp mot den ökade transportkostnaden och omlastningskostnaden som sönderdelning på terminal innebär. Färre stora terminaler är billigare än fler små terminaler både vad gäller sönderdelningskostnad och investeringskostnad för terminalen (Söderström, 2006).

I undersökningen av Eriksson (2012) fann man att det skedde sönderdelning på 86 % av terminalerna och då är det främst stamved som sönderdelas, men även grot, stubbar och träddeklar sönderdelas. Medelterminalen försörjer i snitt tre mottagare med råvara. Enligt denna undersökning passerar 26 % av skogsbränslet genom en terminal (Eriksson, 2012). 10 – 25 % av det flisade materialet lagras på terminal i ungefär 6 månader (Andersson, 2000). Lagring av flis bör ske så kort tid som möjligt för att minska substansförluster genom komposterande effekter i stacken (Nilsson, 2007). Den tekniska utrustningen på terminalerna varierar från elektroniskt mätplatssystem, mätbrygga och våg till att någon utrustning för mätning inte fanns på plats (Eriksson, 2012). På terminaler med hög grad av teknisk utrustning finns oftast tredjepartsmätning och dessa terminaler har en generell större inmätningensvolym per år än terminaler med låg utrustningsnivå.

Lagring av skogsflis på terminal sker i stora avlånga stackar (Lehtikangas, 1999). Vid byggandet av flisstackar stiger temperaturen initialt för att med tiden sedan avta till en temperatur på 40 - 60 °C beroende på var i stacken man mäter (Jirjis et al., 1993). Vid lagring av skogsflis sker substansförluster genom kemisk och biologisk nedbrytning, hur stor substansförlusten blir är beroende på lagringstid, stackstorlek, materialsammansättning och fukthalt vid uppläggning av stacken (Thörnqvist & Jirjis, 1990). Substansförlusterna är redan första veckan 3,6 % och efter en tid har substansförlusterna sjunkit till 0,4 % per vecka (Thörnqvist & Jirjis, 1990). Flis lagrat i stackar får en fuktighetsgradient från fuktigt material i ytan på ca 45 % till ett torrare material i mitten, det fuktigare materialet ligger som en skorpa i ytan. Hur tjock skorpan blir är beroende av ventilationen och kompakteringen i stacken (Jirjis et al., 1993). Vid 3-5 månaders lagring har fukthalten i flisen sänkts med ca 12 % och efter 5 månaders lagring så börjar materialet återfuktas (Thörnqvist & Jirjis, 1990). Torkningen startar genom att värmeutvecklingen i stacken skapar en luftcirkulation med skorstenseffekt där den varma och fuktiga luften ventileras i toppen av stacken (Thörnqvist & Jirjis, 1990). Det effektiva värmevärdet ökar vid lagring på grund av att fukthalten i stacken sänks (Jirjis et al., 1993; Thörnqvist & Jirjis, 1990).

Kostnaden för att lagra skogsflis på terminal består av komponenterna terminalkostnad, omlastningskostnad, substansförluster och kapitalkostnad. Studien av Thörnqvist & Jirjis, (1990) visade på att den totala kostnaden för att lagra skogsflis ett halvår låg på 30-40 kr/m³s.

1.1.6 Södra Skogsenergi

Södra är en kooperativ industrikoncern som verkar på både nationell och internationell nivå och ägs av 51 000 skogsägare i södra Sverige. Medlemmarna äger tillsammans mer än hälften av den privata skogsmarken i södra Sverige (Södra, 2012a). 2011 levererade Södras medlemmar 9 miljoner m³ fub som vidareförädlades i någon av Södras industrier (Södra, 2012b). Södra är uppdelat i fyra affärsområdena Cell, Timber, Interiör och Skog, där det sistnämnda affärsområdet har anskaffningsansvar för de andra tre på cirka 17 miljoner m³ fub vedråvara per år (Södra, 2012b).

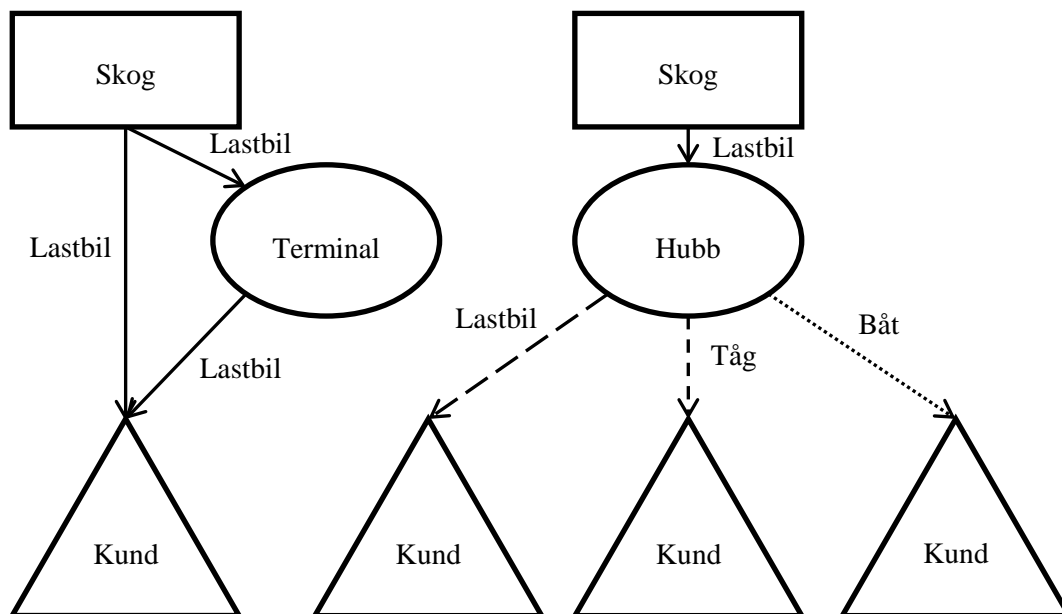
Inom anskaffningsorganisationen Södra Skog ingår verksamhetsområdet Södra Skogsenergi som levererade 5,1 miljoner m³ s biobränsle till marknaden 2011 (Södra, 2012b). Södra Skogsenergis verksamhet bygger på att ta hand om medlemmarnas skogsflis och bränsleved, sälja de biprodukter och pellets som produceras vid Södras industrier samt bedriva torvproduktion (Persson 2012, pers. komm.). Södra Skogsenergis kunder är främst industrier, pelletsfabriker, värme- och kraftvärmeverk (Södra, 2012c).

Södra Skogsenergi använder terminaler för lagringsutrymme, sönderdelning och omlastning till andra transportslag så som båt och tåg (Axmarker 2012, pers. komm.). Beroende på ändamål kan två typer av terminaler särskiljas, terminaler för lagring av bränsle i fortsättningen kallad terminal och terminaler som används för lagring och omlastning till annat transportslag i fortsättningen kallad hubb. 2012 brukar Södra Skogsenergi 35 terminaler och hubbar av varierande storlek och varierande standard. Södras nuvarande terminalstruktur bygger till stor del på terminaler som anlades under stormarna Per och Gudrun för att lagra rundvirke, men där ändamålet har övergått till att lagra biobränsle (Johansson 2012, pers. komm.). Tidigare terminalstrategier har gått ut på att ha ett antal huvudterminaler upprustade till en högre standard och därutöver ha satellitterminaler som är av enklare utförande och lätta att starta upp och stänga ner när behovet ändrar sig. Denna terminalstrategi har aldrig fått ett riktigt genomslag på grund av att det är för svårt att hitta nya terminaler (Johansson 2012, pers. komm.). Mängden skogsflis som förvarades på terminal hösten 2012 var ca 20 % av hanterad årsvolym (Andersson 2013, pers. komm.).

På Södra Skogsenergi sker sönderdelning av grot och träddeklar på avlägg eller i terräng vilket gör att det är skotarmonterade flishuggar och lastbilshuggar som används (Axmarker 2012, pers. komm.). Utvecklingen har gått snabbt framåt med lastbilshuggar och under bränslesäsong 2012/2013 så kommer det att användas sex lastbilshuggar av totalt tjuugoått flisningsenheter, detta ger en ökad servicegrad mot kunder och en effektivisering av försörjningskedjan (Andreasson et al. 2012, pers. komm.).

Södra Skogsenergis strategi för flistransporter fokuserar på att minska transportavstånden och höja andel direktleveranser från skog till kund (Axmarker 2012, pers. komm.). Genom att använda fjärrtransportmedel så som båt och tåg kan mottagare utanför verksamhetsområdet nås och hjälper till att jämna ut variationer i efterfrågan. För lastbilstransporter använder man sig av containerbilar, flisbilar och lastbilshuggar. Strategin för lastbilstransporter är att containerbilar och lastbilshuggar kör korta avstånd som är under 60 km, medan flisbilar kör transportavstånd som är längre än 60 km då de har högre lastvikter och är mer kostnadseffektiva.

För de tre lastbilssträckorna (figur 3) var medeltransportavståndet år 2011 från skog till kund 53 km, från skog till terminal var det 48 km, från terminal till kund var det 62 km (Axmarker 2012, pers. komm.). Fjärrtransporter med båt, tåg och lastbil står för ungefär 7 % av totalvolymen som transporteras.



Figur 3. Transportslag som används på Södra Skogsenergi för att transportera skogsflis från skog till kund via terminal eller hubb. (Axmarker 2012, pers. komm.)

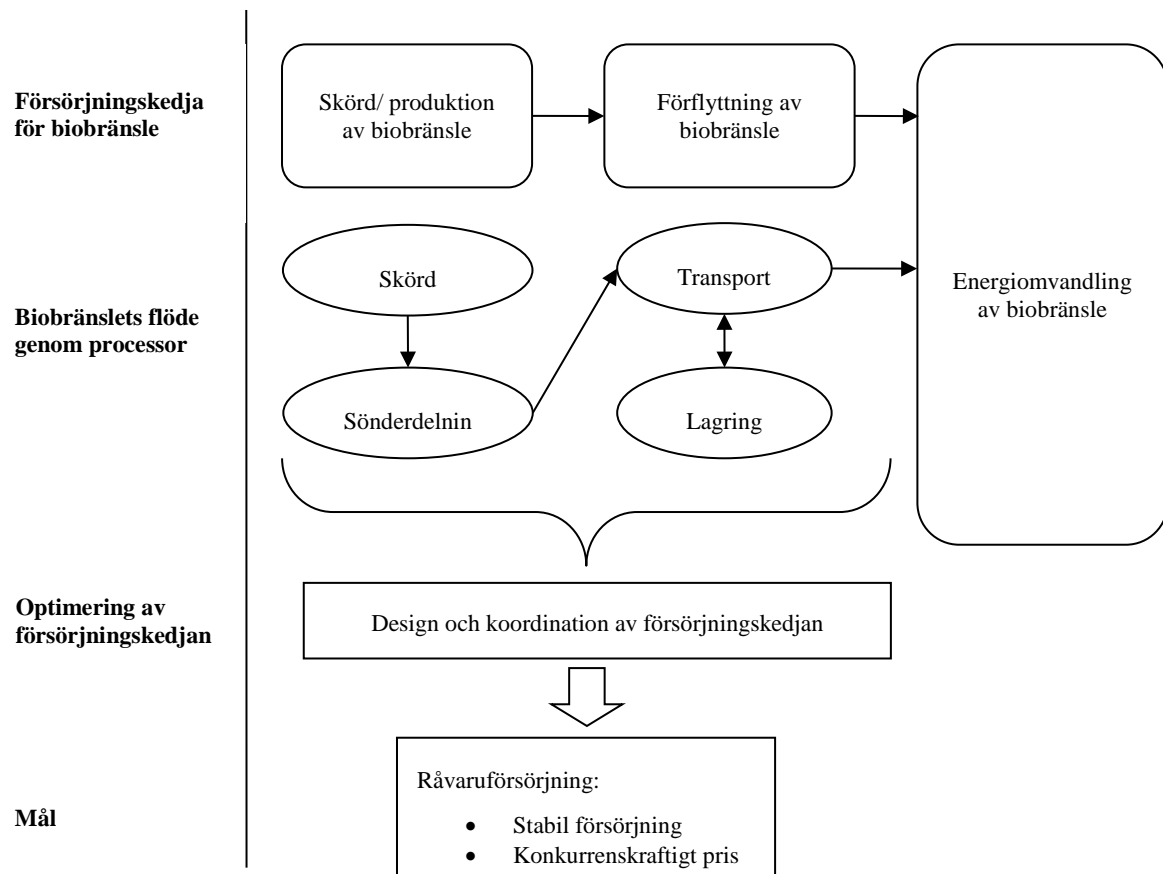
Figure 3. The modes of transport used at Södra Skogsenergi for transporting wood chips from forest to receiver via hub or terminal. (Axmarker 2012, pers. komm.)

1.1.7 Skogsflisens försörjningskedja

Enligt Mattson (2002) så avser uttrycket ”supply chain management” planering, utveckling, organisation, styrning, och kontroll av intra- och interorganisatoriska processer med avseende på flöden av material, tjänster, information och betalningar från råvaruleverantör till slutlig förbrukare. Samverkan och integration mellan företag är organiserat med fokus på den konsumerande slutkunden. Detta synsätt stämmer in på Södra Skogsenergis biobränslestrategi där råvaran kommer från privata markägares skogar som avverkas av Södra Skog eller andra skogsbolag. Rundvirket transporteras och förädlas i Södras industrier, där Södra Skogsenergi tar hand om de biprodukter som förädlats för att sedan levereras till slutkonsument. Parallellt med biproduktsflödet finns ett skogsflisflöde som startar på avverkningsplatsen, där Södra Skogsenergi ansvar för sönderdelning av grot och träddelar till flis som transporteras till slutkonsumenten. Logistiken med produktion, transport och lagring av skogsflis kan därmed betraktas som en delmängd i bioenergis försörjningskedja.

Ett generellt ramverk för biobränslets försörjningskedja (figur 4) skapat av Gold & Seuring (2011) visar huvudaktiviteterna ”Skörd/produktion” och ”Förflyttning” ingår för att skapa ett flöde av biobränsle. På nivån där biobränslet passerar genom processor har den vanligaste försörjningskedjan för skogsflis i Sverige illustrerats. Styrande faktorer för skördeprocessen är avverkningsmetoder, tider för avverkning och miljöpåverkan. Faktorer

som styr sönderdelning är maskinsystem, kvalitet och kvantitet på råvara. Transport är beroende av infrastruktur och lastkapaciteten på transportmedel. Faktorer som styr lagring är lagringskapacitet, risk för kvalitativa och kvantitativa förluster. Försörjningskedjans design och koordination måste styras av de uppsatta målen som enligt Gold & Seuring (2011) är stabil försörjning och ett konkurrenskraftigt pris. Logistiska problem av denna typ är ofta komplexa och måste beakta ekonomiska-, sociala- och miljövärden (Gold & Seuring, 2011).



Figur 4. Ramverket för hur en försörjningskedja ska byggas upp då målet är säker försörjning och ett konkurrenskraftigt pris. Källa: Gold & Seuring (2011)

Figure 4. The framework for how to build a supply chain when the goal is a secure supply and a competitive price. Source: Gold & Seuring (2011)

1.1.8 FlowOpt

Skogforsk har utvecklat beslutsstödet FlowOpt som hjälper beslutsfattare att hantera beslut på taktisk och strategisk nivå (Flisberg et al., 2012b). Modellen har en målformulering som går ut på att maximera den ekonomiska vinsten av de summerade intäkterna minus summan av kostnaderna. Anskaffnings- och försörjningskedjan för biobränsle är mer komplex än för rundvirke och storleken på problemet växer snabbt då det är många variabler och bivillkor till följd av att modellen bygger på både tid och rum (Flisberg et al., 2012b). Eftersom programmet bygger på ekonomiska variabler så måste allt värdesättas från kundernas efterfrågan till transport- och produktionskostnad. FlowOpt kan använda sig av tre olika lösningsmetoder för att lösa problemet; binär lösning, linjärprogrammering (LP) och heuristisk lösning. Där LP-metoden går snabbast och den binära lösningsmetoden

tar längst tid. Vilken typ av lösningsmetod man använder är beroende av hur man ställer upp problemet (Gunnarson et al., 2001).

1.2 Tidigare studier

Sedan länge finns det verktyg för flödesoptimering av rundvirke något som har anammats av den svenska skogsindustrin (Forsberg et al., 2005; Bergdahl et al., 2003). För skogsbränsle finns det många studier som visar på hur man optimerar försörjningskedjor för enskilda värmeverk (Wittenström, 2013) och studier för utvärderingar av olika försörjningskedjor, men det är få studier som behandlar lokalisering och lagerkapacitet för terminaler i ett regionalt perspektiv. Gronalt & Rauch (2007) beskriver hur ett försörjningsnätverk för skogsbränsle kan utformas för en region med hjälp av en optimeringsmodell. Målet är att försörjningsnätverket av skogsindustrier, skogsägare, skogsföretag och värmeverk ska samarbeta för att logistiksystemet ska kunna bli så kostnadseffektivt som möjligt och därmed säkra skogsbränslets konkurrenskraft mot andra bränslen (Gronalt & Rauch, 2007; Gronalt & Rauch, 2010). En kalkyl för bränslebalansen är ingången till optimeringsmodellen där systemets kapaciteter, kostnader och möjliga platser för terminaler har specificerats. Tre scenarier är utformade för att se hur olika terminalstrukturer påverkar utfallet av medeltransportavstånden, systemkostnaden och den totala kostnaden för respektive område.

I slutet av 80-talet utvecklade Eriksson & Björheden (1989) en modell för flödesoptimering av skogsbränsle. Målet med modellen var att undersöka hur transporter, lagring och upparbetning av materialet påverkas av energiinnehållet för olika sortiment. Studien genomfördes på Jämtlandsbränslen och behandlade sortimenten bränsleved, avverkningsrester, träddelar och biprodukter från sågverk. Materialet kunde flisas med mobila flisare och med terminalflisare. Modellen letar efter en optimal lösning i ett steady-state över sex tidsperioder. Erfarenheten av studien visar att den optimala lösningen är att minimera transportkostnaden, det är denna kostnad som har störst påverkan på totalkostnaden. Resultatet av fallstudien visar att 46 % av materialet bör flisas på avlägg resten på terminal. Amplituden av lagernivåer på terminal var högre i det optimala fallet än vad studieföretaget verkligen hade, detta till följd av kapitalkostnad. Det visar också på en skillnad i vilken typ av material som lagras vilket i ett optimalt fall är de material som har låg kapitalkostnad och goda lagringsegenskaper. Björheden & Eriksson (1990) menar på att förändringen i energiinnehåll är något som inte bör förbises vid operativ planering av biobränsle, på det hela taget menar de på att modellen har god verklighetsförankring och kan användas i verksamheten (Eriksson & Björheden, 1989). Samma författare har gjort en studie för att se hur räntan påverkar val av sortiment och lagervolymer. Högre ränta innebär mindre lagervolymer med kortare lagringsperiod (Björheden & Eriksson, 1990). Man undersökte också hur substansförluster i materialet påverkar lagernivåer. Resultatet visade att utan substansförluster så byggs flislagret upp i mars och växer successivt under sommaren medan vid inkludering av substansförluster så börjar man bygga upp ett lager av flisade produkter först i juni-juli, däremot är lagret av oflisad material på terminal mycket högre. Slutsatsen blev att man ska flisa materialet så sent som möjligt tidsmässigt och att substansförluster är en viktig del i planeringen av försörjningskedjan för biobränsle.

Rapporten supply chain modeling of forest fuel (Gunnarsson et al., 2004) beskriver en modell för hur skogsbränslets försörjningskedja kan struktureras och användas för både strategiska och taktiska beslut. Modellen är utformad som ett beslutsstöd för beslutsfattare inom logistik och försörjningskedjor. Modellen är uppställd med en målfunktion som ska

minimera kostnaderna för hela försörjningskedjan, skogsbränsle från skog till kund och biprodukter från sågverk. Modellen fattar beslut om hur olika transportslag, sönderdelningstekniker och terminaler ska användas. Analysen gjordes på Sydved energileveransers norra distrikt och bestod av sex delproblem relaterade till uppbyggnaden av försörjningskedjan. Resultatet från studien visar på att en större andel av materialet skulle sönderdelas på terminal. Lagring av flis på terminal ska enbart ske under månaderna juni till november. Resterande månader ska det finnas ett säkerhetslager på minst 10 000 m³s.

”A manual solution process often works fine in the beginning of the year, but towards the end of the year there is a tendency to be *‘locked into a corner’*. ... Using an optimization model which cover the whole year, we can avoid these situations.”(Gunnarsson et al., 2004 s.119)

Citatet sammanfattar ett grundläggande tankesätt om varför optimeringsverktyg bör användas vid flödesplanering av skogsflis.

I en fallstudie av Flisberg et al. (2012b) gjord på Stora Enso Bioenergi ingick det 86 värmeverk med ett totalbehov av 3,6 TWH. Målet med studien är att analysera de metoder som används för flisning, transport, allokering och lagring av skogsbränslen. De logistiksystem som analyserades innehöll, fem olika sönderdelningssystem, sex lastbilstyper, 72 terminaler och 27 tågssystem. Resultatet av studien visar att det optimala systemet skulle kunna sänka kostnaderna med 6,3 % medan vinsten skulle kunna öka med 21 %. Olika sönderdelningssystem för grot analyserades och man kom fram till att volym som sönderdelas i skogen kunde minskas med 20 % och att volymen som sönderdelas med lastbilshugg skulle öka från 19 % till 68 %. Minskad flisning i skogen innebar en ökad kostnad för transport vilket tjänades igen på en billigare sönderdelningskostnad på terminal. Slutsatsen av rapporten säger att planeringshorisonten bör vara minst ett år och med månader som minsta tidsperioder. Aggregeringen av försörjningsenheter är att föredra så att antalet inte är mer än 300-400 stycken för då ökar antalet variabler mer än värdet av informationen.

I en liknande fallstudie med Sveaskog användes samma modell på ett område i mellan Sverige. Optimeringsresultatet gav en potentiell vinst på 15 kr/MWh och det genomsnittliga transportavståndet var 40 km. 72 % av volymen flisades på avlägg med antingen skotarmonterad flishugg eller lastbilshugg och resterande volym transporterades oflisad till mottagare eller terminal för att krossas med en terminalkross. (Flisberg et al., 2012a)

1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att skapa ett underlag för en terminalstrategi på Södra Skogsenergi. Strategin ska visa hur terminaler ska användas och placeras i logistikkedjan för skogsflis med avseende på terminalantal och andel av årsvolym att lagra på terminal, i ett strategiskt och taktiskt perspektiv för Södra Skogsenergi.

1.4 Mål

- Utredda hur stor andel av årsvolymen skogsflis som måste lagras på terminal för att kunna tillgodose Södras kundbehov i ett tidsperspektiv fram till och med bränslesäsong 2014/2015.
- Utredda hur antalet terminaler för lagring av skogsflis påverkar lönsamheten och transportavstånd vid en given lagringskapacitet och kundbehov i ett tidsperspektiv fram till och med bränslesäsong 2014/2015.
- Visa hur terminalernas upptagningsområde förändras vid olika terminalstrukturer, med avseende på storlek och placering.

2 Material och Metod

2.1 Material

2.1.1 Geografisk information

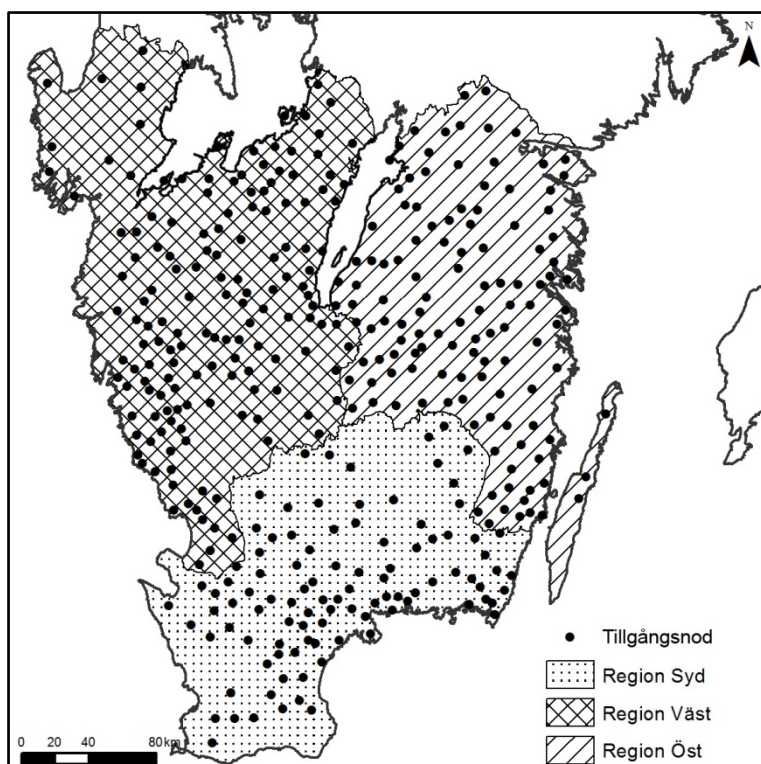
Denna studie har genomförts på Södra Skogs tre regioner (syd, väst och öst) vilket i stora drag är detsamma som Götaland exkl. Gotland. Koordinater för mottagningsplatser, terminaler och hubbar har hämtats från Södras register och från SDC. Södras administrativa gränser har tillhandahållits från Södras GIS-system genom Svensson (pers. komm. 2012). Den geografiska information som beskrivs i tabell 1 har använts i analysen och för att illustrera resultatet av analysen.

Tabell 1. Teknisk beskrivning av det geografiska data som använts i analysen
Table 1. Technical description of the geographical data used in the analysis

Filnamn	Format	Variabler	Årtal	Källa
Administrationsgränser	Vektor, polygon	Regioner och verksamhetsområden	2010	Södra
Församlingar	Vektor, polygon	Råvarutillgång, råvarukostnad	2012	Lantmäteriet
Mottagningsplatser	Vektor, punkter	Energiförbrukning, bränslepris	2012	Södra/SDC
Terminaler	Vektor, punkter	Lagringskapacitet, lagringskostnad	2012	Södra
SNVDB	Vektor, linjer	Vägegenskaper	2012	Lantmäteriet/SDC

2.1.2 Tillgångsnoder

De församlingar som fanns inom analysområdet och hade en registrerad skogsflisvolym de senaste tre bränslesäsongerna har definierats som tillgångsnoder, vilket till antal blir 664 stycken (figur 5). En centrumkoordinat (tillgångsnod) har med hjälp av ArcGIS 10 (ESRI, 2013) satts ut i varje församling i vilken all skogsflisvolym för församlingen samlats. Södras prislista på skogsflis för bränslesäsong 2012/2013 låg till grund för anskaffningskostnaden av skogsflis i varje tillgångsnod inkluderat anskaffningsersättning till inköpsorganisationen.



Figur 5. Karta över Södra Skogs tre regioner (syd, väst, öst) med de tillgångsnoder som använts i analysen.

Figure 5. Map of Södra Skog's three regions (syd, väst, öst) with the supply points used in the analysis.

Varje tillgångsnod har tilldelats en råvaruandel per region utifrån medlet av de tre senaste bränslesäsongernas flisade volymer. Råvarutillgången för en tillgångsnod har erhållits genom råvaruandelen per region och prognosen för råvarutillgång per region (tabell 2) i m^3s för sortimentsgruppen skogsflis. Den totala råvarutillgången för de tre bränslesäsongerna är 3,5 miljoner m^3s .

Tabell 2. Prognos för råvarutillgång i m^3s av skogsflis för respektive bränslesäsong och region
Table 2. Forecast for wood chip availability (m^3loose) for each year and region

Region	2012/2013 (m^3s)	2013/2014 (m^3s)	2014/2015 (m^3s)
Syd	471 750	555 000	555 000
Väst	527 000	620 000	620 000
Öst	607 750	715 000	715 000

2.1.3 Produktionsenheter

I denna studie motsvarades en produktionsenhet av antingen en skotarmonterad flishugg eller en lastbilshugg. Antalet produktionsenheter och dess egenskaper har hämtats från

bränslesäsong 2012/2013 års produktionsplan. Varje produktionsenhet tilldelades ett arbetsområde som bestod av ett antal församlingar inom vilket produktionsenheten användes för att uppfylla avtalad volym. Från den avtalade volym som skall flisas per år fick utfallet variera med $\pm 20\%$. I avtalen fanns det reglerat hur stor del som skulle produceras på lågsäsong (sommar) och högsäsong (vinter) samt under vilka månader respektive period sträckte sig. Avtalad volym för bränslesäsong 2012/2013 var totalt 1 735 000 m³s fördelat på de tre regionerna. Jämfört med råvarutillgången i tabell 2 medförde detta en överkapacitet på region syd och öst men en underkapacitet på region väst, kapacitetsutbyte mellan regionerna var inte möjligt. För bränslesäsong 2013/2014 och 2014/2015 höjdes den avtalade volymen med 5 % för att kompensera att råvarutillgången höjts. 20 % av den avtalade volymen var kontrakterad med lastbilshugg, kontrakterad volym var ojämnt fördelad mellan regionerna. Sönderdelningskostnad och skotningskostnad definierades för varje system och per region och angavs i kr/m³s. För varje produktionsenhet bestämdes en maxkapacitet (m³s/månad). Skotningskapaciteten ansågs inte begränsande då den mängd grot och träddeklar som skulle flisas hade legat på torkning minst ett år och reglerades istället av hur stor volym skogsflis som blev tillgängligt varje bränslesäsong enligt tabell 2. Produktiviteten för lastbilshugg uppskattades till 80 m³s/ G₁₅h och för skotarmonterade flishugg uppskattades den till 60 m³s/ G₁₅h (Andreasson et al., 2012 pers. komm.). Produktiviteten för skotarmonterad flishugg var något lägre än för lastbilshugg till följd av väntetid på containrar.

2.1.4 Transport

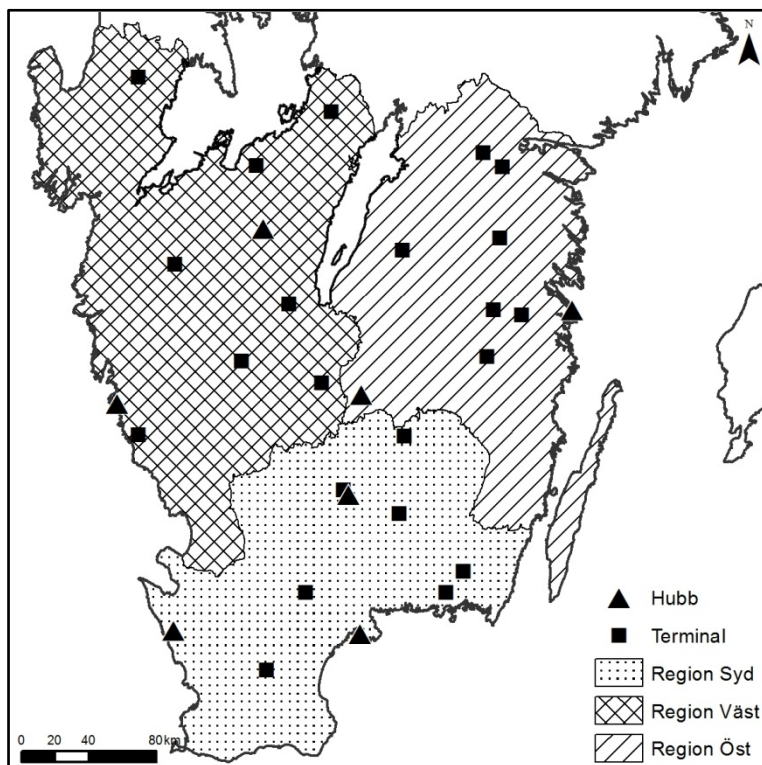
Transporter som analysen behandlat har skett med tre lastbilstyper; lastbilshugg, containerbil och flisbil. För vart och ett av dessa system angavs transportkostnaden i kronor per kubikmeterkm utifrån Södras transportprislista för 2012. Respektive transportsystem har tilldelats en transportkapaciteten som angivits i kubikmeterkm för både månad och år. Möjliga transportsträckor har för lastbilshugg och containerbil angivits som från tillgångsnod till mottagare, hubb eller terminal. För flisbil har möjliga transportsträckor angivits som från terminal till mottagare eller hubb.

2.1.5 Terminaler

För bränslesäsong 2012/2013 planerade Södra Skogsenergi att använda 22 terminaler och 7 hubbar (figur 6) med en lagringskapacitet för skogsflis på 403 000 m³s på terminal och 77 000 m³s på hubb (Andreasson et al., 2012, pers. komm). Lagringskapaciteten för en terminal angavs som den mängd skogsflis som enligt miljötillståndet fick lagras på terminalen vid ett och samma tillfälle. Lagringskostnaden på terminal delades upp i årskostnad, månadskostnad och hanteringskostnad:

- Årskostnad (kr/m²/år)
 - Hyra
 - Avskrivning
- Månadskostnad (kr/m³/månad)
 - Substansförluster
 - Kapitalbindning
- Hanteringskostnad (kr/m³)
 - Stackning av flis i limpor
 - Utlastning

Årskostnaden motsvarade hyra eller avskrivning och var beroende av terminalens storlek. Månadskostnaden motsvarade kapitalbindningskostnad och kostnad för substansförlust vilket angavs som en schablonkostnad. Hanteringskostnaden uppstod när flisen kördes in på terminal för att stackas upp i limpor och när flisen lastades på lastbil igen för transport till mottagare. Fördelat på de tre regionerna var terminalernas lagringskapacitet för region syd 144 000 m³s, region väst 158 000 m³s och region öst 101 000 m³s. Terminalernas tillgänglighet för ut- och intransport av skogsflis var året runt.



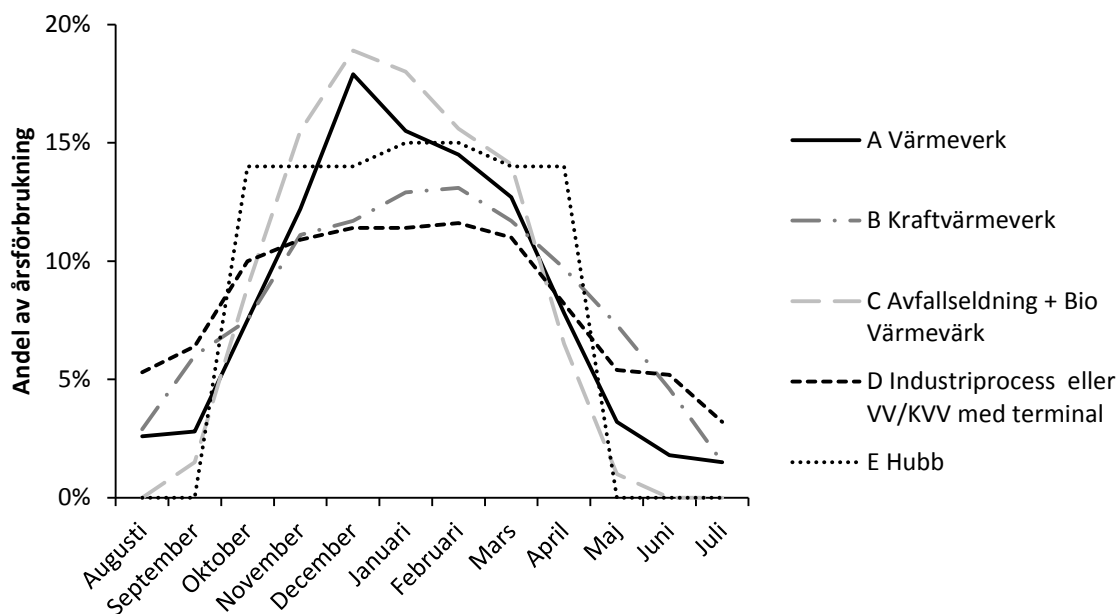
Figur 6. Södra Skogsenergis terminalstruktur för skogsflis med 22 terminaler och 7 hubbar.
Figure 6. The wood chip terminal structure of Södra Skogsenergi with 22 terminals and 7 hubs.

Den geografiska spridningen av terminaler som visas i figur 6 har hög täckningsgrad över hela analysområdet. Lagringskapaciteten per terminal skiljde sig från terminal till terminal där minsta lagringskapaciteten var 8 000 m³s och den största lagringskapaciteten var 45 000 m³s. Två terminaler hade vid början av bränslesäsong 2012/2013 ett ingående lager som var lika stort som lagringskapaciteten. På flertalet av terminalerna lagras det inte enbart skogsflis utan det kan även lagras andra sortiment.

2.1.6 Mottagningsplatser

I ett strategiskt perspektiv var det osäkert vilka mottagningsplatser som kommer att vara kunder framöver och därför skapades en fiktiv sammansättning av mottagningsplatser. En inventering gjordes tillsammans med Södra Skogsenergi där alla mottagningsplatser som hade en årsförbrukning större än 15 GWh av skogsflis och fanns inom analysområdet listades. Mottagarna delades in i fyra kategorier beroende på vad de producerade; A för värmeverk, B för kraftvärmeverk, C för avfallseldande värmeverk med biobränslepanna och D för industriprocesser eller värmeverk/kraftvärmeverk med egen terminal. Varje kategori kopplades till en efterfrågekurva för hur deras förväntade förbrukning av skogsflis

förväntades att se ut under en bränslesäsong. En hubb omfattar en terminaldel och en mottagningsdel där mottagningsdelen hade en fiktiv förbrukning som motsvarande utleveransen av skogsflis via båt, järnväg eller lastbil enligt efterfrågekurva E. De fem efterfrågekurvorna visas upp i figur 7 där det syns att kategori A och C var de två kategorier med störst säsongsvariation medan minst säsongsvariation återfanns i kategori D.



Figur 7. Efterfrågekurvor för att skatta efterfrågan hos en mottagare vid en specifik tidpunkt.

Figure 7. Demand curves used to estimate the demand at a receiver at a specific time.

Mottagarna delades in efter vilken av de tre regionerna (syd, väst, öst) som de tillhörde. För varje region och mottagningstyp har ett pris definierats som fritt levererat vid industri. För kategori E beräknades ett individuellt pris för respektive hubb, priset angavs som fritt lastat för vidare transport.

Tabell 3 visar en sammanställning av de potentiella volymer som mottagare på respektive region förväntas förbruka över de kommande tre bränslesäsongerna. Den förbrukade volymen bedöms vara 8,2 miljoner m³s för bränslesäsong 2012/2013 och stiger sedan med 4,5 % respektive 14,1 % för bränslesäsong 2013/2014 och 2014/2015. Under tiden fram till bränslesäsong 2014/2015 förväntades en nyetablering av ett antal större mottagare, dessa har ingått i analysen från den bränslesäsong då deras förbrukning förväntades starta.

Tabell 3. Mottagarnas årsförbrukning (PD_{jr}) summerat per region, exkluderat hubb
Table 3. Annual consumption at demand points (PD_{jr}) summarized by region, (hubs excluded)

Region	2012/2013 (m^3s)	2013/2014 (m^3s)	2014/2015 (m^3s)
Syd	1 763 275	2 014 275	2 579 025
Väst	2 986 900	2 986 900	3 426 150
Öst	3 414 855	3 534 080	3 732 370

För de mottagare med leverans via fjärrtransport gjordes en bedömning av hur stora leveranser Södra Skogsenergi väntas göra under de tre kommande bränslesäsongerna. Den bedömda volymen fördelades på respektive hubb och bränslesäsong. Totalt bedömdes att för bränslesäsong 2012/2013 skulle 303 710 m^3s levereras till mottagare med fjärrtransport via hubb, för bränslesäsong 2013/2014 och 2014/2015 var motsvarande volym 263 550 m^3s respektive 276 100 m^3s .

2.2 Metod

Frågeställningen för arbetet delades upp i tre delar där svaret från den första delen låg till grund för de andra delarna. För att besvara de tre frågeställningarna användes beslutstödet FlowOpt. I det första steg samlades all data in som skulle ligga till grund för variabler och bivillkor i modellen. En förenklad version av Södra Skogsenergis logistikkedja för skogsflis byggdes upp i FlowOpt. Därefter anpassades allt insamlat data till variabler och bivillkor som sattes in i modellen. Modellen har sedan optimerats och resultatet har bearbetats och analyserats med hjälp av ArcGIS 10.

2.2.1 Optimeringsmodellen

I FlowOpt programmerades optimeringsproblemet som ett LP-problem med det matematiska modelleringsspråket AMPL (AMPL, 2013) och den lösningsmetod som användes var simplex i form av programvaran cplex (IBM, 2013). Modellen som använts för att beskriva Södra Skogsenergis försörjningskedja hade 2 775 685 variabler och 227 705 bivillkor. Målfunktionen för problemet var att maximera vinsten (z) av intäkter och kostnader enligt:

$$\max z = \sum Intäkter - \sum Kostnader$$

Intäkten kom från försäljning av skogsflis medan kostnaderna var för transport, produktion, råvara och lagring. Årskostnaden för terminaler och hubb ingick inte i optimeringsmodellen utan har lagts till i efterhand. Optimeringsmodellen (bilaga A) som användes var en omarbetad version av den som presenterats av Flisberg et al. (2012b). Optimeringen genomfördes på en tidshorisont om tre bränslesäsonger som startar med bränslesäsong 2012/2013 och slutar med bränslesäsong 2014/2015. Varje tidsperiod (t) definierades som en månad. Första månaden i en bränslesäsong var augusti och den sista var juli.

$1 \leq t \leq 12$ för augusti till juli, bränslesäsong 2012/2013

$13 \leq t \leq 24$ för augusti till juli, bränslesäsong 2013/2014

$25 \leq t \leq 36$ för augusti till juli, bränslesäsong 2014/2015

I optimeringsmodellen ingick ett flertal bivillkor som finns utförligt beskrivna i bilaga A. För produktionsenheterna fanns det bivillkor som begränsade maximal och minimal produktion på månadsnivå (1, 2) och för hela planperioden (3, 4) (tabell 4). För lastbilshuggarna fanns det bivillkor som begränsade den totala arbetstiden (5) och arbetstiden som var tillgänglig för transport (6). För transportenheterna fanns det bivillkor som begränsade det maximala transportarbetet på månadsnivå (7). För terminaler och hubbar fanns det bivillkor som begränsade lagringskapaciteten för respektive månad (8, 10). För mottagare fanns det ett bivillkor som styrde att efterfrågad volym uppfylldes (9). För tillgångsnoder, terminaler, hubbar och mottagare fanns det bivillkor som styrde volymbalansen per månad (11, 12, 13, 14, 15).

Tabell 4. Sammanställning av bivillkoren som använts i optimeringsmodellen

Table 4. Summary of the constraints used in the optimization model

Bivillkor		Typ	Månadsnivå	Planperiod
1, 2, 3, 4	Produktion	Maximal/minimal produktion	X	X
5, 6	Lastbilshuggar	Maximal arbetstid	X	X
7	Transport	Maximalt transportarbete	X	
8	Terminaler	Maximal lagringskapacitet	X	
9	Mottagare	Efterfrågan	X	
10	Hubb	Maximal lagringskapacitet	X	
11, 12, 13, 14, 15	Transportpunkter	Volymbalans	X	

För bivillkor 3, 4, 5, 6 och 9 krävdes förberedande beräkningar innan de kunde användas i modellen. För bivillkor 3 och 4 gjordes förberedande beräkning för att avspegla säsongsvariationen i produktionsförutsättningar (figur 8). För julleddighet sänktes produktionen i december ($t=5, 17, 29$) med 20 %. I januari och februari ($t=6, 7, 18, 19, 30, 31$) sänktes produktionen med 20 % på grund av snöfall. I april ($t=9, 21, 33$) sänktes produktionen med 40 % på grund av tjällossning. För maximal produktion lågsäsong infördes ett jämnhetskrav som styrde att maximal produktionen ej fick överstiga minimal produktionen med 50 %. G_n reglerade att den producerade volymen fick avstiga med 20 %

från den avtalade volymen. Den maximala och minimala produktionen för respektive maskin beräknades enligt följande:

$$u_{nt}^{f+} = \begin{cases} \frac{Vl_n}{Ml_n} * 1,5 & \text{lågsäsong} \\ K_n * F_t & \text{högsäsong} \end{cases}$$

$$u_{nt}^{f-} = \begin{cases} \frac{Vl_n}{Ml_n} & \text{lågsäsong} \\ \frac{Vh_n}{Mh_n} * G_n * F_t & \text{högsäsong} \end{cases}$$

u_{nt}^{f+} : Maximal produktion (m³s/månad) för produktionsenhet n i tidsperioden t

u_{nt}^{f-} : Minimal produktion (m³s/månad) för produktionsenhet n i tidsperioden t

Vl_n : Avtalad volym (m³s/år) som ska produceras under lågsäsong med produktionsenhet n

Vh_n : Avtalad volym (m³s/år) som ska produceras under högsäsong med produktionsenhet n

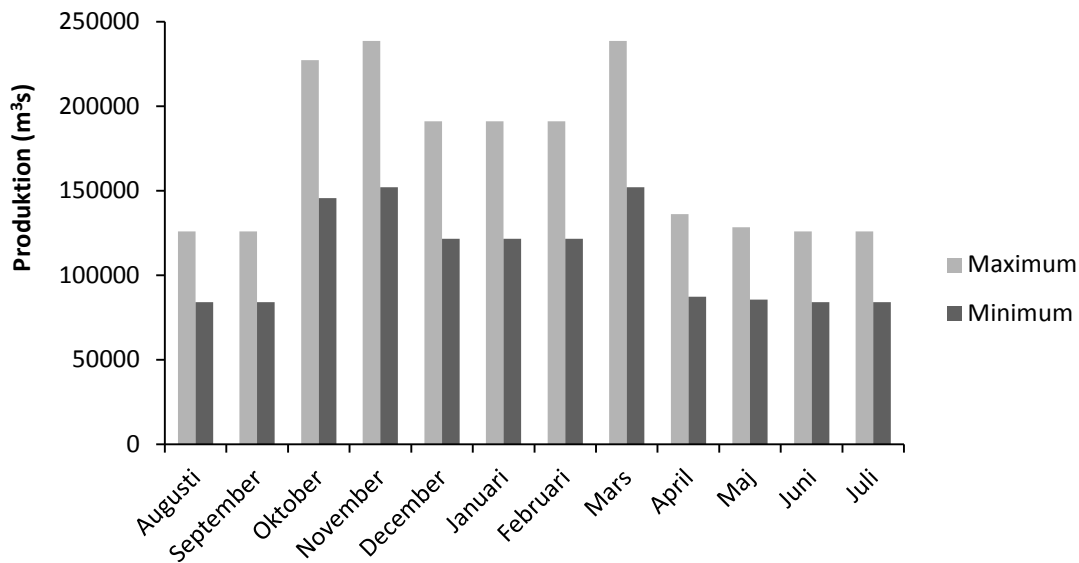
Ml_n : Avtalad tid (månader) som volymen Vl_n ska produceras under lågsäsong med produktionsenhet n

Mh_n : Avtalad tid (månader) som volymen Vh_n ska produceras under högsäsong med produktionsenhet n

K_n : Maximal produktionskapacitet (m³s/månad) för produktionsenhet n

G_n : Procent som producerad volym får avvika från avtalad volym för produktionsenhet n

F_t : Produktionsbegränsande faktorer i procent, exempelvis julleddighet, snö och tjällossning



Figur 8. Variationen mellan månader i maximal och minimal produktion för bränslesäsong 2012/2013 summerat för alla produktionsenheter.

Figure 8. The monthly variation in maximum and minimum production of wood chips for year 2012/2013.

Lastbilshuggarnas maximala arbetstid regleras av bivillkor 5 och den maximala arbetstiden för transport regleras av bivillkor 6. För att styra förhållandet mellan maximal arbetstid, maximal tid för transport och maximal tid för produktion skapades följande förhållande:

$$u_{kt}^{KA+} = u_{nt}^{K+} - u_{nt}^{f+}$$

u_{nt}^{K+} : Maximalt antal arbetstimmar (h) för lastbilsystem k i tidsperioden t

u_{kt}^{KA+} : Maximalt antal arbetstimmar (h) för transport med lastbilshugg k i tidsperioden t

Bivillkor 9 styrde att levererad volym skulle vara densamma som efterfrågad volym respektive månad. Den efterfrågade volymen för varje månad hos respektive mottagare skattades av mottagarens årsförbrukning, Södra Skogsenergis marknadsandel i respektive region och efterfrågekurvan för respektive månad enligt följande formel:

$$D_{jtr} = M_r * PD_{jr} * E_{jt}$$

D_{jtr} : Årlig efterfrågan (m³s/år) vid mottagare j under tidsperiod t i region r

M_r : Marknadsandel (%) för region r

PD_{jr} : Årsförbrukning (m³s/år) för mottagare j i region r

E_{jt} : Efterfrågekurvan (%) från figur 7 för mottagare j i tidsperioden t

Marknadsandelen beräknades som en funktion av prognos för råvara och mottagarnas årsförbrukning enligt:

$$M_r = (\sum_{i \in I} T_{ir} - \sum_{j \in J^H} D_{jr}) / \sum_{j \in J^H} PD_{jr}$$

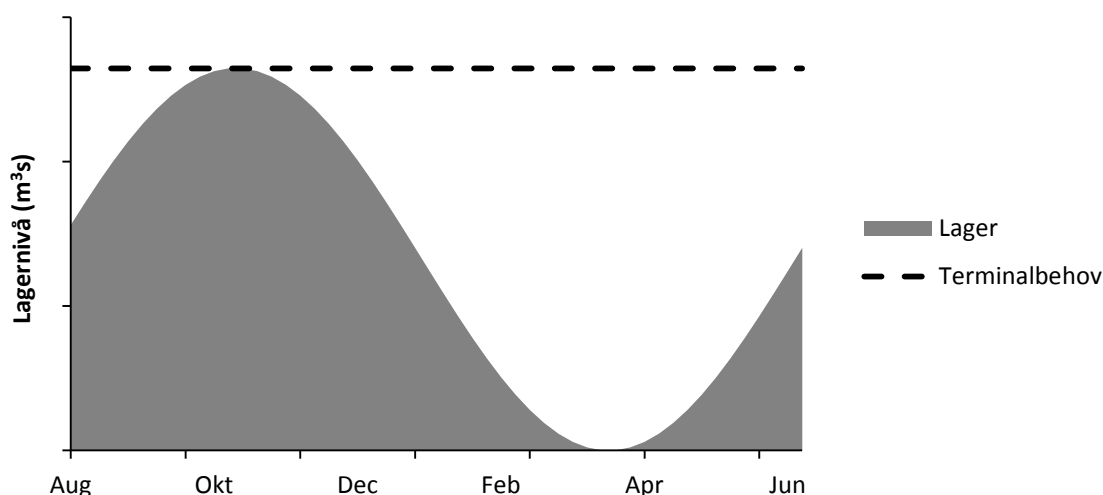
T_{ir} : Prognos ($\text{m}^3\text{s}/\text{år}$) för råvara från församling i i region r

J^H : Alla mottagare som hör till kategorin hubb

Efter optimering erhöles en resultatfil från FlowOpt med data om lastbilsflöden, flisningsproduktion, lagerflöden vid terminal, lagerflöden vid hubb och en ekonomisk sammanställning.

2.2.2 Terminalandel

För att göra arbetet lättförståeligt så har de två begreppen *terminalandel* och *terminalbehov* instiftats. Terminalandel är den andel av årsvolymen som måste lagras på terminal eller hubb för att kunna tillgodose mottagarnas efterfrågan på skogsflis året runt. I figur 9 visas hur lagernivån på en terminal förändras över en bränslesäsong. Terminalbehovet (figur 9) för en terminal definieras som den maximala lagernivån under en bränslesäsong. Terminalbehovet för hela försörjningskedjan definieras som alla terminalers samlade terminalbehov.



Figur 9. Samband mellan terminalbehovet och lagernivån under en bränslesäsong.

Figure 9. Correlation between the need of terminal and stock levels during a year.

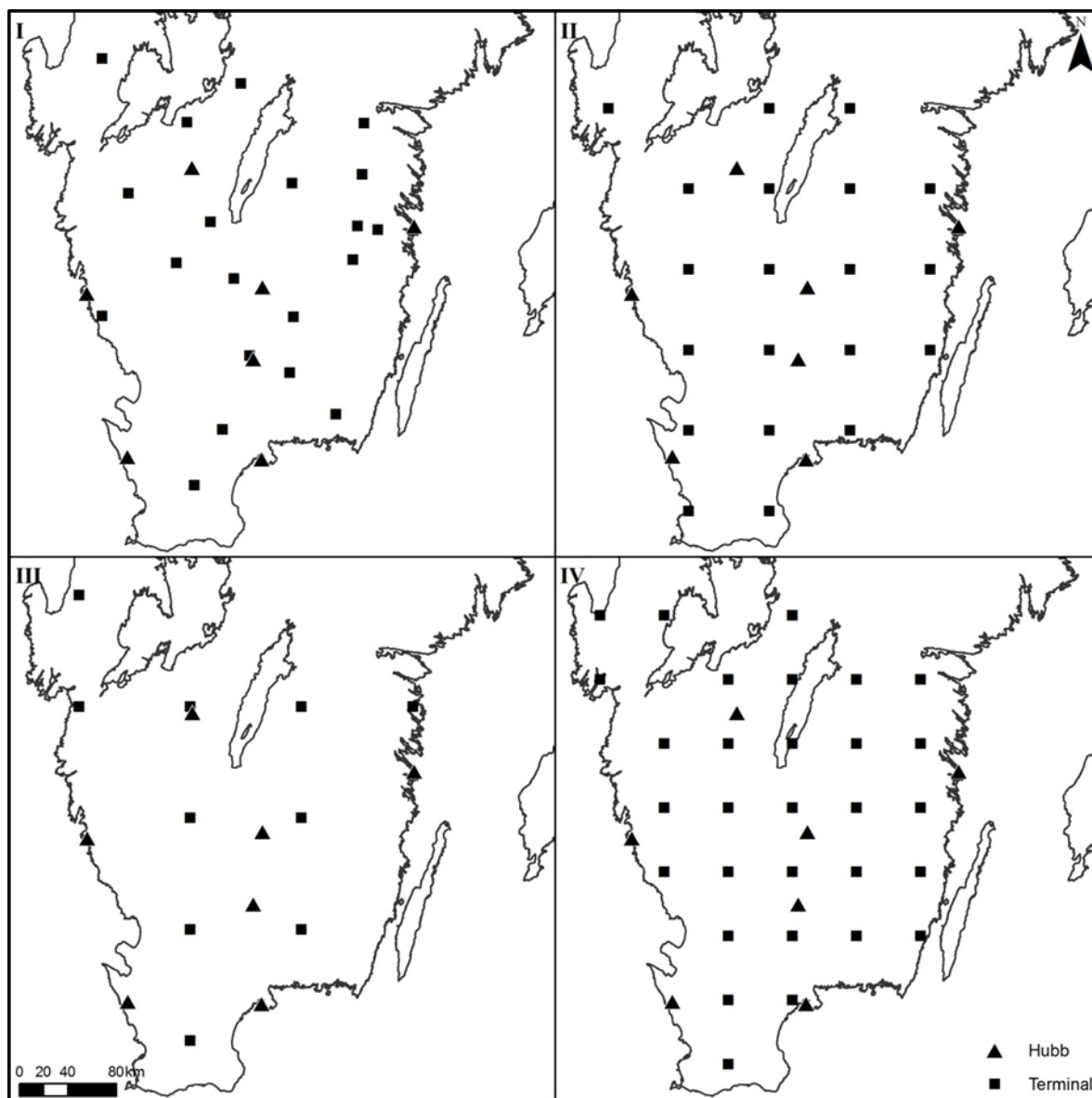
Ett scenario skapades med förutsättningar hämtade från Södra Skogsenergis verksamhet år 2012. Detta scenario kommer i fortsättningen att kallas referensscenario. Utav de 22 terminaler som Södra Skogsenergi planerade att använda 2012 förändrades terminalstrukturen genom hopslagning av två par närliggande terminaler så att 20 terminaler återstod. Referensscenariot optimerades och utifrån resultatfilen har lagerinformationen om terminal och hubb hämtats och summerats. Lagernivåns förändring över tiden har analyserats så att terminalbehovet kunnat identifieras enligt principskissen i figur 9. Den maximala lagernivån för respektive terminal och bränslesäsong söktes fram och summerades för respektive region. Hubbarna inkluderas i terminalbehovet eftersom de består av både en mottagardel och en terminaldel med lagringskapacitet. För att beräkna

terminalandelen har terminalbehovet dividerats med den totala årsvolymen av tillgänglig råvara (tabell 2) för respektive region och bränslesäsong.

2.2.3 Terminalstruktur

För att utreda hur transportavstånd och lönsamhet förändrades vid olika antal terminaler användes en scenarioanalys, vilket har visat sig vara en tillämplig metod i flera andra studier (Gronalt & Rauch, 2007; Gunnarsson et al., 2004). Till scenarioanalysen skapades tre scenarier, utöver referensscenariot, med varierande antal terminaler och terminalförutsättningar men där övriga variabler var desamma. Antalet terminaler, placering och lagringskapacitet kallas i fortsättningen terminalstruktur. Scenario A, B och C hämtade förutsättningar ifrån resultatet av referensscenariot med avseende på lagringskapacitet och lagringskostnad. Antalet hubbar och deras egenskaper var detsamma i alla fyra scenarier. Scenarierna utformades enligt följande:

- Referensscenario med bränslesäsong 2012/2013 terminalstruktur, 20 terminaler enligt figur 10 karta I.
- Scenario A med 20 terminaler, systematiskt utplacerade över verksamhetsområdet, figur 10 karta II.
- Scenario B med 10 terminaler systematiskt utplacerade över verksamhetsområdet, figur 10 karta III.
- Scenario C med 30 terminaler systematiskt utplacerade över verksamhetsområdet, figur 10 karta IV.



Figur 10. Karta I visar terminalstrukturen i referensscenariot med 20 terminaler och 7 hubbar. Karta II visar hur de 20 terminalerna i scenario A placerats. Karta III visar hur de 10 terminalerna i scenario B placerats. Karta IV visar hur de 30 terminalerna i scenario C placerats.

Figure 10. Map I shows the terminal structure of the referencescenario, with 20 terminals and 7 hubs. Map II shows how the 20 terminals in scenario A are placed. Map III shows how the 10 terminals in scenario B are placed. Map IV shows how the 30 terminals in scenario C are placed.

Skapandet av terminalstruktur i scenario A, B och C gjordes genom att systematiskt placera ut terminaler i ett rutmönster med utlottning av en startposition. I scenario A var det euklidiska avståndet 67 km mellan terminalerna, i scenario B var det euklidiska avståndet 92 km och i scenario C var det euklidiska avståndet 53 km. Terminaler som placerats på platser som var fysiskt eller praktiskt omöjliga att använda plockades bort. Om antalet terminaler var för få efter justering gjordes en ny lottning av startposition tills dess att antalet terminaler stämde överens med önskat antal.

Terminalerna i scenario A, B och C var fiktiva och deras lagringskapacitet beräknades till respektive regions terminalbehov plus 20 % delat på antalet terminaler i regionen.

Årskostnaden för de nya terminalerna har angivits som medelkostnad (kr/m^2) multiplicerat med ytan på de nya terminalerna (m^2) per region som visas i tabell 5. Månadskostnad och hanteringskostnad för scenario A, B och C angavs på samma sätt som för terminalerna i referensscenariot, med schablonbelopp.

Tabell 5. Årskostnad, månadskostnad och hanteringskostnad angivet som medelkostnaden för respektive scenario

Table 5. Yearly, monthly and handling costs at the terminals for each scenario

Terminal	Årskostnad (kr/m^2)	Månadskostnad ($\text{kr/m}^3\text{s}$)	Hanteringskostnad ($\text{kr/m}^3\text{s}$)
Hubb	12	2,5	12
Referensscenario, Terminal 1-20	10,5	1,25	10
Scenario A, Terminal 1-20	10,5	1,25	10
Scenario B, Terminal 1-10	10,5	1,25	10
Scenario C, Terminal 1-30	10,5	1,25	10

Ingående lager för respektive terminal i referensscenariot var angivet som medel av de två senaste bränslesäsongerna. För scenario A, B och C fördelades varje regions ingående lager jämnt på terminalerna.

Utifrån resultatet av scenariooptimeringarna beräknades det ekonomiska nettot för hela planperioden för respektive scenario enligt samma formel som användes för att maximera vinsten (z), kompletterat med årskostnaden för terminaler och hubbar. Från resultatfilen med lastbilsflöden beräknades den volymvägda medeltransportkostnaden och det volymvägda medeltransportavståndet.

2.2.4 Upptagningsområden

Utifrån optimeringsresultaten av scenarierna har kartor med upptagningsområden skapats i ArcGIS 10. Från resultatfilen med lastbilsflöden selekterades flöden från tillgångsnoder till terminal eller hubb, liksom flöden från terminal till hubb. Varje tillgångsnod med ett flöde till terminal eller hubb kopplades till respektive församling och bildade därmed ett upptagningsområde som kunde knytas till den terminal som församlingen försörjde. Flöden från terminal till hubb med flisbil söktes fram och visades med verktyget XY to Line (ESRI, 2013). För att kvantifiera upptagningsområdenas storlek i respektive scenario användes det volymvägda medeltransportavståndet från tillgångsnod till terminal. Medeltransportavstånd och kvantitet hämtades från resultatfilen med lastbilsflöden.

2.2.5 Verifiering

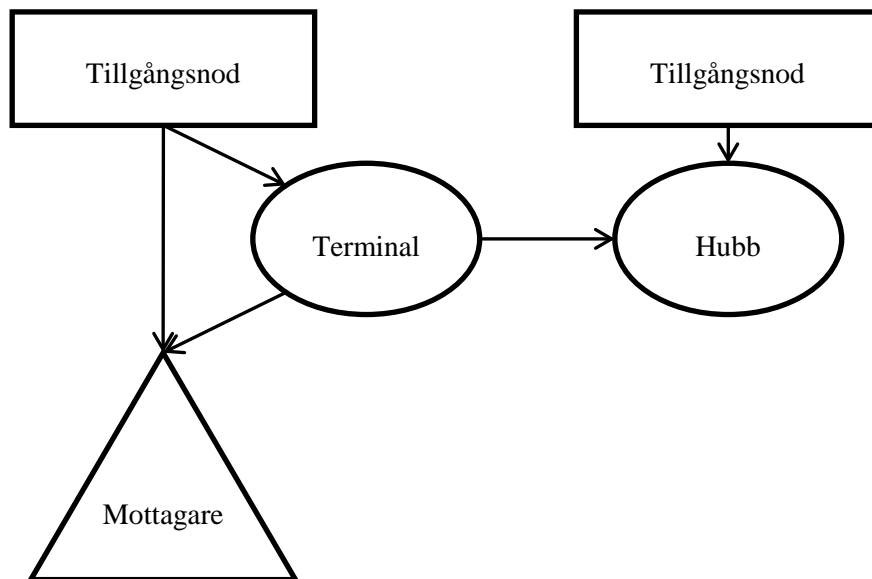
Verifiering av modellen och resultatet har skett genom att jämföra resultatet med Södra Skogsenergis erfarenhetstal angående transportavstånd. De parametrar som jämfördes var medeltransportavstånd och kostnaden för skogsflis för respektive flöde. Utifrån resultatfilen från respektive scenario beräknades det volymvägda medeltransportavståndet från tillgångsnod till mottagare, tillgångsnod till terminal, terminal till mottagare och det volymvägda medeltransportavståndet för alla flöden.

En sammanställning av kostnaderna för att producera, transportera och lagra skogsflisen har räknats fram utifrån optimeringsresultatet i referensscenariot. Sammanställningen har sedan jämförts och diskuterats i diskussionen.

2.3 Avgränsningar

Arbetet har enbart behandlat sortimentsgruppen skogsflis som innefattar sortimenten grotflis, trädelsflis och trädelsflis ek och som hanteras av Södra Skogsenergi. Inga externa parter för köp eller försäljning av skogsflis ingick i analysen.

Analysen har enbart behandlat transporter med lastbil från skog till mottagare, skog till terminal, från terminal till hubb och från terminal till mottagare enligt figur 11. Båt, tåg och lastbilstransporter från hubb har betraktats som en förbrukning i hubben motsvarande leveransplanen från hubb. Lagring av skogsflis har endast varit möjligt på de transportpunkter som illustreras med ovala symboler i figur 11.



Figur 11. Flöden av skogsflis mellan de transportpunkter som ingått i analysen.

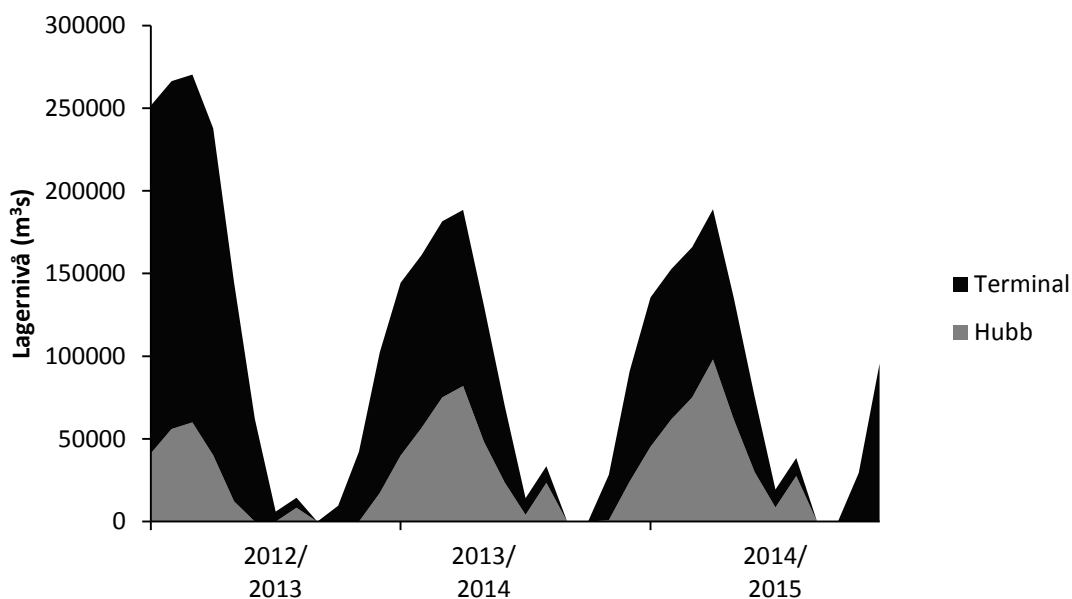
Figure 11. Flows of wood chips between the transport points included in the analysis.

Hur hantering av säkerhetslager av skogsflis ska hanteras och lagras har inte behandlats av denna analys, på grund av att Södra Skogsenergis räknar med att säkerhetslaget utgörs av stamvedsflis istället för skogsflis. Terminallagret i juni och juli ($t=35, 36$) bränslesäsong 2014/2015 har inte analyserats på grund av att det byggs upp utan påverkan från kommande bränslesäsong.

3 Resultat

3.1 Optimeringsresultat

Optimeringsresultatet från referensscenariot visade att säsongsvariationen i lagernivån följt den säsongsvariationen som har varit historiskt förekommande. I samtliga scenarier var det ingående lagret på terminal högt inför första bränslesäsongen. Lagret var så högt att ett par av terminalerna redan har nått maximal lagerkapacitet och det var därför inte möjligt att lagra mer flis på dessa. Den flis som produceras för att upprätthålla minimum produktionen på produktionsenheterna transporterades i första hand till mottagare och resterande volym transporterades till hubb. I november ($t=3$) bränslesäsong 2012/2013 började uttransporterna från terminal och varade fram till och med april ($t=9$). Samtidigt började uttransport med båt och tåg från hubb vilket ledde till minskande lagernivå på hubb. Gemensamt för de tre bränslesäsongerna var att lagret tömdes under april ($t=9, 21, 33$) på både hubb och terminal vilket visas i figur 12. När lagret för kommande bränslesäsong skulle byggas upp startades uppbyggandet på terminal, där efter byggdes lagret på hubb upp. I juni och juli ($t=35, 36$) 2015 lagrades all flis på terminal på grund av att det var dyrare att lagra flis på hubb än terminal.



Figur 12. Summerad lagernivån fördelat på terminal och hubb för referensscenariot.

Figure 12. Summed inventory level distributed among terminals and hubs for the reference scenario.

För alla tre bränslesäsonger transporterades det in skogsflis till hubb i mars ($t= 8, 20, 32$) för att klara av efterfrågan i april ($t=9, 21, 33$) då produktionen sänktes på grund av tjällossning. Transporterad volymen från skog till hubb i mars ($t=20$) 2014 var 19 311 m³s och var ungefär densamma året efter. Förändringen av lagernivån liknar varandra mellan regionerna. Det som skiljdes åt var fördelningen mellan hubb och terminal. Regioner med stor lagringskapacitet på hubb hade en högre andel av lagret på hubb. Den volym som lagrades på region syd ökade mellan bränslesäsong 2012/2013 och bränslesäsong 2013/2014. Den effekten var tvärt emot vad som inträffade på de andra två regionerna där lagernivån kraftigt minskade mellan bränslesäsongerna.

Hubbarna utnyttjades i högsta möjliga utsträckning under bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 (tabell 6). Eftersom lagret på terminal var så högt bränslesäsong 2012/2013 fanns det inget behov av att fylla hubbarna under denna bränslesäsong, istället transporterades skogsflis från terminaler till hubbar då behov uppstod. Det var bara Hubb B som inte utnyttjades den första och andra bränslesäsongen vilket berodde på att den inte satts i drift förrän till sista bränslesäsongen. Ingen av hubbarna med en lagringskapacitet över 10 000 m³s fylldes under bränslesäsong 2012/2013.

Tabell 6. Procentuell användning av lagringskapaciteten för respektive hubb under respektive bränslesäsong

Table 6. Percentage use of storage capacity for each hub during each year

Hubb	Lagringskapacitet (m ³ s)	Användning 2012/2013	Användning 2013/2014	Användning 2014/2015
Hubb A	20000	54%	100%	100%
Hubb B	20000	0%	0%	100%
Hubb C	4000	100%	100%	0%
Hubb D	5000	100%	100%	100%
Hubb E	18000	59%	100%	100%
Hubb F	5000	100%	100%	100%
Hubb G	30000	84%	100%	100%

Bränslesäsong 2012/2013 användes 51 % av den sammanlagda lagringskapaciteten på terminalerna vilket var en följd av det höga ingångslagret. För bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 var motsvarande användning 27 % respektive 23 %. Terminal J och Terminal U var de ända terminaler som fylldes både bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015, medan Terminal R var i princip full under bränslesäsong 2013/2014 och använde hälften av lagringskapaciteten bränslesäsong 2014/2015. Övriga terminaler hade ett relativt lågt utnyttjande under bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 varav sju terminaler inte användes alls. De terminaler som låg nära en hubb hade alla ett lågt utnyttjande.

Tabell 7. Procentuell användning av lagringskapaciteten för respektive terminal under respektive bränslesäsong

Table 7. Percentage use of storage capacity for each terminal during each year

Terminal	Lagringskapacitet (m ³ s)	Användning 2012/2013	Användning 2013/2014	Användning 2014/2015
Terminal A	15000	58%	0%	0%
Terminal B	30000	100%	50%	0%
Terminal C	30000	21%	14%	28%
Terminal D	20000	16%	1%	0%
Terminal F	11000	78%	0%	0%
Terminal G	8000	16%	0%	0%
Terminal H	20000	64%	0%	0%
Terminal I	15000	88%	53%	31%
Terminal J	12200	100%	100%	100%
Terminal K	20000	66%	0%	0%
Terminal L	15000	61%	7%	0%
Terminal M	45000	20%	10%	0%
Terminal N	21000	39%	47%	38%
Terminal O	10000	6%	0%	0%
Terminal P	24000	63%	0%	20%
Terminal Q	30000	62%	15%	18%
Terminal R	20000	37%	92%	38%
Terminal S	18000	12%	10%	25%
Terminal T	30000	37%	30%	41%
Terminal U	8000	77%	100%	100%

Summerat på både hubb och terminal för bränslesäsong 2012/2013 (tabell 7) användes 56 % av den sammanlagda lagringskapaciteten. För bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 var motsvarande siffra 37 % respektive 38 %.

3.2 Terminalandel

Resultatet för terminalandel och terminalbehov har hämtats från den optimering som heter referensscenario. På grund av det höga ingångslagret av skogsflis var terminalbehovet (tabell 8) högt för bränslesäsong 2012/2013. Under vintern omsattes hela lagret och har därför inte påverkat terminalbehovet de följande två bränslesäsongerna. Det summerade terminalbehovet sjönk med 28 % från bränslesäsong 2012/2013 till bränslesäsong 2013/2014. Mellan 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 sjönk terminalbehovet 8 %, minst var förändringen på region öst medan region väst hade störst förändring. En av skillnaderna var att 16 000 m³s lagrades på hubb istället för terminal till följd av att Hubb B öppnades och att Hubb C stängdes inför den sista bränslesäsongen.

Tabell 8. Terminalbehovet för respektive region specificerat över bränslesäsong och fördelat på hubb eller terminal

Table 8. Need for storage at the terminals specified over year, region and if it is stored at hub or terminal

		Syd (m ³ s)	Väst (m ³ s)	Öst (m ³ s)	Totalt (m ³ s)
	Hubb	25 354	5 000	30 304	60 658
2012/2013	Terminal	31 296	113 846	57 469	202 612
	Totalt	56 650	118 846	87 773	263 269
	Hubb	42 000	5 000	35 000	82 000
2013/2014	Terminal	27 385	53 858	27 096	108 338
	Totalt	69 385	65 300	62 096	190 338
	Hubb	38 000	25 000	35 000	98 000
2014/2015	Terminal	20 915	25 815	29 485	76 215
	Totalt	58 915	50 815	64 485	174 215

Terminalandelen i tabell 9 har erhållits utifrån tabell 8 och tabell 2. Det höga ingående lagret inför bränslesäsong 2012/2013 ger en hög terminalandel i tabell 9. För de två senare bränslesäsongerna låg den totala terminalandelen relativt lika men andelen som lagrades på hubb ökade till följd av att Hubb B öppnades och att Hubb C stängdes inför den sista bränslesäsongen. Enbart 4 % av årsvolymen lagrades på terminal bränslesäsong 2014/2015 vilket är en minskning med 68 % från bränslesäsong 2012/2013. Summerat över alla tre bränslesäsonger så mellanlagrades 12 % av volymen på terminal eller hubb.

Tabell 9. Terminalandel för respektive bränslesäsong fördelat på hubb och terminal
Table 9. Percentage of annual volume that have to be stored at terminal or hub in each year

	2012/2013	2013/2014	2014/2015
Hubb	3,8%	4,3%	5,2%
Terminal	12,6%	5,7%	4,0%
Totalt	16,4%	10,1%	9,2%

3.3 Terminalstruktur

Resultatet från scenarioanalysen ska besvara vilken av terminalstrukturen som var mest lönsam ur ett transportavståndsmässigt och ekonomiskt perspektiv.

Det ekonomiska nettot för scenario A, B och C var relativt lika medan nettot för referensscenariot var drygt tre miljoner lägre (tabell 10). Detta beror på att årskostnaden var 2 851 tkr högre i referensscenariot än i de tre andra scenarierna. Referensscenariot hade både lägre transportkostnad och kortare medeltransportavstånd än vad scenario A, B och C hade. Transportkostnad och medeltransportavståndet har hög korrelation mellan varandra. Av scenarierna med systematiskt utplacerade terminaler så hade scenario C med flest antal terminaler det kortaste medeltransportavståndet medan scenario B med minst antal terminaler hade det längsta medeltransportavstånd. Både referensscenariot och scenario A har 20 terminaler men hade ändå en skillnad på 1,3 km i medeltransportavstånd.

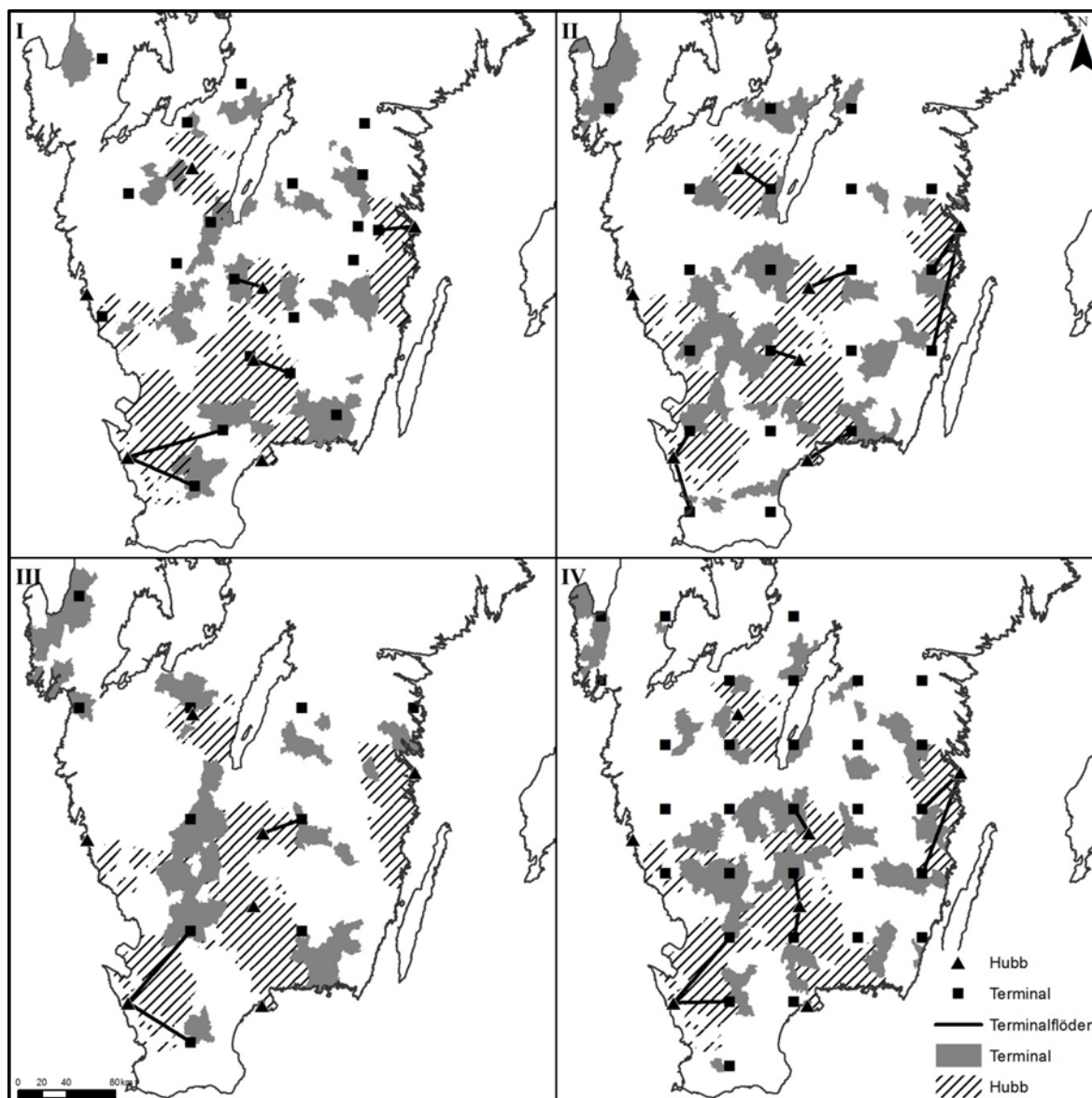
Tabell 10. Sambandet mellan antalet terminaler, ekonomiskt netto, transportkostnad och medeltransportavstånd (volymvägt)

Table 10. The relationship between the number of terminals, the total revenue, transportation cost and average transport distance (volume weighted)

	Terminaler	Netto (tkr)	Transportkostnad (kr/m ³ s)	Transportavstånd (km)
Referensscenario	20	57 376	23,49	42,2
Scenario A	20	60 772	23,89	43,5
Scenario B	10	60 567	23,94	43,8
Scenario C	30	60 973	23,85	43,4

3.4 Upptagningsområde

I referensscenariot transporterades 1 048 296 m³s från tillgångsnoderna till terminal eller hubb. 27 777 m³s fraktades från en terminal till en hubb vilket visas med svarta streck i figur 13. Det transporterades skogsflis från terminal till hubb under december, januari och februari (t=5, 6, 7) bränslesäsong 2012/2013.

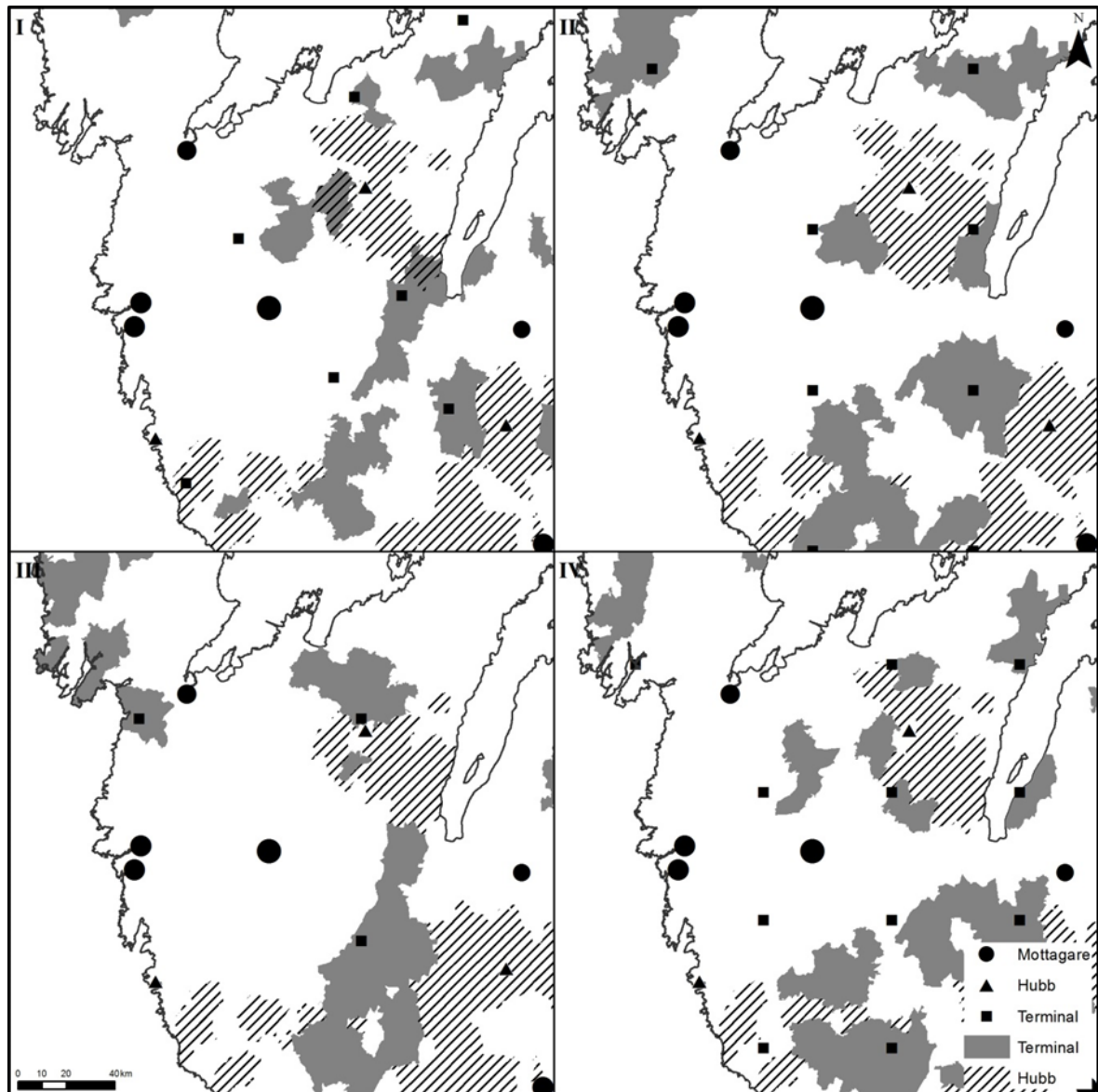


Figur 13. Kartorna beskriver upptagningsområde för terminal och hubb samt de flöden som sker från terminal till hubb under bränslesäsong 2012/2013. Kartan I är referensscenariot, karta II är scenario A, karta III är scenario B och karta IV är scenario C.

Figure 13. The maps describe the supply area of terminals and hubs, and the flows from terminal to hub. Map I shows referencescenario, map II shows scenario A, map III shows scenario B and map IV shows scenario C.

Referensscenariot och scenario A (figur 13) hade samma antal terminaler men med skiftande terminalstruktur. Trots de olika strukturerna var det i stort sett samma församlingar som var upptagningsområde i de båda figurerna. Scenario B (figur 13) hade minst antal terminaler men med högre lagringskapacitet per terminal. Därför koncentrerades upptagningsområdena runt terminalerna i en högre utsträckning. Upptagningsområdets storlek per terminal var större än i de övriga scenarierna. Scenario C hade flest antal terminaler, med lägre lagringskapacitet per terminal. I karta IV (figur 13) för scenario C är det svårt att urskilja vilket upptagningsområde som hör till respektive terminal.

Resultaten i figur 13 visar att ju fler terminaler desto mindre upptagningsområde per terminal. Medeltransportavståndet från tillgångsnod till terminal sjönk ifrån 29,7 km i scenario B till 27,6 km i scenario C. Färre antal terminaler ger ett större sammanhängande upptagningsområde som sträcker sig i mitten av analysområdet från norr till söder. Medan fler terminaler resulterade i fragmenterade upptagningsområde.



Figur 14. Kartorna beskriver upptagningsområde för terminal, hubb och mottagare för ett exempelområde runt Göteborg. Kartan I är referensscenariot, karta II är scenario A, karta III är scenario B och karta IV är scenario C.

Figure 14. The maps describes the supply area of terminals and hubs in an area around Göteborg. Map I shows referencescenario, map II shows scenario A, map III shows scenario B and map IV shows scenario C.

Terminalernas och hubbarnas upptagningsområde koncentrerades till de områden där det fanns råvara och där det inte fanns några större mottagare. I figur 14 har de största mottagarna markerats och i deras närområde var det låg förekomst av upptagningsområde för terminaler eller hubbar. I dessa vita områden (figur 14) sker det uteslutande direkttransport till mottagare. Terminalernas optimala upptagningsområde bör teoretiskt

sett vara ett cirkulärt område runt terminalen. I figur 14 syns hur terminalernas optimala upptagningsområde har reducerats till förmån för direktleveranser till mottagarna vilket har lett till en förskjutning av terminalernas upptagningsområde till motsatt sida av mottagaren. I karta IV (figur 14) visas hur upptagningsområdena för terminaler med låg kapacitet har flyttats ifrån terminalen så att det uppstått ett avstånd mellan upptagningsområdet och terminalen. Detta har lett till ett längre medeltransportavstånd från tillgångsnod till terminal än vad som hade varit fallet om terminalens upptagningsområde placerats cirkulärt runt terminalen.

3.5 Verifiering

För att verifiera resultatet och modellen jämfördes de optimerade scenarierna med erfarenhetstal från Södra Skogsenergi. Medeltransportavståndet var relativt lika mellan scenarierna (tabell 11). Däremot sjönk medeltransportavståndet från 56 km bränslesäsong 2011/2012 till ett genomsnitt på 43,2 för de fyra scenarierna. Av flödena var den största minskning på medeltransportavståndet från tillgångsnod till terminal vilket i genomsnitt minskade med 20 km. Medeltransportavståndet från terminal till mottagare var i genomsnitt 14 km längre i scenarierna A, B och C än i bränslesäsong 2011/2012. I scenarierna var medeltransportavstånden för flödena; tillgångsnod till mottagare och tillgångsnod till terminal kortare än bränslesäsong 2011/2012 vilket resulterade i att medeltransportavståndet från terminal till mottagare ökade. I scenarierna har terminaler som var längre från mottagarna använts till följd av att transporter med flisbil var mer kostnadseffektivt än transporter med containerbil.

Tabell 11. Transportavstånd för respektive flöde och hur de har förändrats mellan scenarierna och erfarenhetstal ifrån Södra Skogsenergi (Axmarker 2012, pers. komm.)

Table 11. Transport distance for each flow and how they have changed between scenarios in comparison to key figure from Södra Skogsenergi (Axmarker 2012, pers. komm.)

	Direkttransport		Via terminal		
Transportavstånd	Andel (%)	Tillgångsnod till mottagare (km)	Tillgångsnod till terminal (km)	Terminal till mottagare (km)	Medel (km)
2011/2012	78	53	48	62	56
Referensscenario	88	40,6	28,9	72,6	42,2
Scenario A	88	42,6	25,7	77,0	43,5
Scenario B	88	42,5	29,7	76,0	43,8
Scenario C	88	42,1	27,6	77,6	43,4

Totalkostnaden för råvara, produktion och transport av skogsflis till mottagare var i referensscenariot 155 kr/m³s. Produktionskostnaden tillsammans med råvarukostnaden var 126 kr/ m³s. Transportkostnaden var 24,7 kr/m³s. Terminalkostnaden fördelat på den omsatta volymen var 4,7 kr/m³s medan varje kubikmeter skogsflis har kostat 40,1 kr/m³s

att lagra på terminal. Hanteringskostnaden motsvarar 50 % av lagringskostnaden, vilket förklaras av att lastningskostnaden för järnväg och båt ingick. 6 månader var den genomsnittliga lagringstiden vilket kostade 9,1 kr/ m³s i månadskostnaden.

4 Diskussion

4.1 Modellen

FlowOpt är en komplex modell som tar hänsyn till ett stort antal parametrar och ger möjlighet att optimera logistikkedjan för ett större biobränsleföretag som Södra Skogsenergi. Resultatet av detta arbete har visat att FlowOpt kan anses lämpligt för analys av hur stor terminalandel som en försörjningskedja bör ha dimension för samt hur medeltransportavstånd, transportkostnad och upptagningsområde förändras vid ändrad terminalstruktur. Att direkt implementera ett optimerat resultat i den operativa verksamheten är omöjligt eftersom det finns många faktorer som påverkar verkligheten men som inte har tagits med i modellen. Det analyserade optimeringsresultatet utgör istället ett viktigt beslutsunderlag för vilken riktning framtida terminalstrategier bör ha med avseende på terminalandel, terminalstruktur och upptagningsområde.

Metoden att optimera flera scenarier med en ändrad förutsättning för att jämföra hur den ändrade förutsättningen påverkar logistikkedjan har visat sig vara lyckat vilket flera tidigare studier har bekräftat exempelvis Gronalt & Rauch (2007). Med hjälp av FlowOpt har det varit enkelt men tidskrävande att genomföra denna analys. Optimeringstiden för varje scenario var över 17 timmar och det har därför inte varit möjligt att genomföra en känslighetsanalys och därmed säkerställa att resultatet gäller även vid ändrade förutsättningar.

Modellens flexibla lösning gör att man kan bygga upp en försörjningskedja som tar med viktiga parametrar för att avspegla verkligheten. Det stora antalet parametrar och att modellen är komplex gör att en ändring av en parameter kan ge oväntade effekter i resultatet. Det är därför viktigt att modellen förenklas till den grad att förändringarnas påverkan på resultatet är kontrollerbara. I denna analys användes 664 tillgångsnoder och 36 tidsperioder vilket förstorade modellen. Istället för att använda tre bränslesäsonger á 12 tidsperioder så skulle två bränslesäsonger á 12 tidsperioder minskat modellens storlek men ändå resulterat i ett tillförlitligt resultat.

Kvaliteten på indata till modellen är en avgörande faktor på hur adekvat resultatet blir. En fiktiv mottagarsammansättning användes för att vara oberoende av vilka mottagare som kommer vara framtida kunder. Den fiktiva mottagarsammansättningen har haft fler stora mottagare än vad Södra Skogsenergi levererade till 2012. Lika så har många mindre mottagare som Södra Skogsenergi levererar till uteslutits på grund av begränsningen att mottagare skulle ha en förbrukning större än 15 GWh. Råvarutillgången per församling hämtades från de tre senaste bränslesäsongerna och kan därför ha påverkats av enskilda händelser som ger en överrepresentation av råvara i en specifik församling. Modellen förutsatte att all råvara var tillgänglig för både skotarmonterad flishugg och lastbilshugg vilket inte var fallet på Södra Skogsenergi. Produktionsenheternas maximala och minimala produktion bygger på antagande som gjorts tillsammans med Södra Skogsenergis produktionsledare. Antagande om hur mycket produktionen sänks för snöförhållande i januari och februari eller för tjällossningen i april stämmer ganska bra för ett normalår. Men den grova uppskattningen tar inte hänsyn till skillnader mellan olika år och att tjällossningen inte inträffar samtidigt på alla tre regioner. Transportkapaciteten för containerbilssystemet har definierats som ett gemensamt system för alla produktionsenheter, i verkligheten var det ett containerbilssystem efter varje produktionsenhet med en specifik transportkapacitet. Kostnadsparametrarna hämtades från

bränslesäsong 2012/2013 och var konstanta över hela planperioden, kostnadsparametrarna har haft liten inverkan på resultatet.

4.2 Resultat

4.2.1 Terminalandel

Resultatet för bränslesäsong 2012/2013 med en terminalandel på 16,4 % (tabell 9) måste ses som en följd av det höga ingående lagret i analysen. Det gav därför inte en rättvis bild av vad den optimala terminalandelen borde varit under denna bränslesäsong. Det höga ingående lagret i analysen omsattes helt under den första bränslesäsongen och har därför inte påverkat de efterföljande två bränslesäsongerna. Att terminalandelen ändras från 10,1 % till 9,2 % (tabell 9) mellan bränslesäsong 2013/2014 och 2014/2015 tyder på att de två större mottagare som tillkom inför den sista bränslesäsongen har påverkat terminalandelen. Det två större mottagare var av kategori D vilket minskade terminalbehovet eftersom de har en efterfrågekurva med lägre amplitud. I resultatet (figur 12) transporterades 19 311 m³s skogsflis till hubb i mars (t=32) för att lagras till april (t=33) då tjällossningen inträffade, i den operativa verksamheten bedöms detta som svår genomförbart. Om möjligheten att transportera in skogsflis till terminal eller hubb begränsats under vintern skulle ytterligare 19 311 m³s behöva lagras på terminal under sommaren vilket skulle öka terminalandelen med 1,0 % – enhet. Med hänsyn till att den första bränslesäsongen var påverkad av det ingående lagret och att det borde funnits en begränsning som hindrade transport in till terminal under vintern så skulle den optimala terminalandelen vara 11 %. Vid så låg terminalandel är logistikkedjan känslig för variation i produktion och efterfrågan och bör därför ses som en minimum nivå.

Resultatet för terminalandel (kap. 3.2) har visat att terminalbehovet skulle vara jämnt fördelat över de tre regionerna vilket skiljer sig mot Södra Skogsenergis nuvarande strategi. Eftersom metoden inte varit anpassad för att beräkna varje regions terminalbehov kan ingen säker slutsats dras av detta. Resultatet ska inte tolkas på den detaljnivån att 4 – 5 % (tabell 9) av årsvolymen ska lagras på hubb och 5 – 6 % ska lagras på terminal. Istället konstateras att så stor del som möjligt ska lagras på hubb eftersom lagernivån har nått maximal lagringskapacitet under både bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 för samtliga hubbar, detta till trots en högre lagringskostnad på hubb än terminal.

Årskostnaden för terminaler var 2 851 000 kr högre i referensscenariot än i scenario A, B och C, till följd av överflödigt lagringskapacitet. Vid sänkt terminalandel till 11 % fanns en besparingspotential på 950 000 kr per år enbart i sänkt årskostnad. Hösten 2012 hade Södra Skogsenergi ett skogsflislager på 20 % av årsvolymen, att halvera lagret över en bränslesäsong betraktas som orimligt men med en omstrukturering av produktionsresurser bör ett strategiskt mål vara att terminalandelen sänks. Utöver besparingarna på årskostnaden så tillkommer besparing av hanteringskostnad och månadskostnad.

De tre felkällor som haft störst påverkan på terminalandelen var mottagarnas efterfråga, produktionsenheterna maximala och minimala produktion. Efterfrågan av skogsflis för respektive månad var en funktion av mottagarnas årsförbrukning och kategori. Den grova inventering som gjordes kan ha missat potentiella mottagare och kan ha överskattat alternativt underskattat mottagarnas årsförbrukning av skogsflis. Flera av mottagarna hade möjlighet att elda flera olika bränslen och valde därför det bränslet som var billigast, vilket

gjorde det svårt att uppskatta deras skogsflisförbrukning. Noggrannheten för hur produktionsenheternas maximala produktion har antagits i förhållande till den faktiska maximala produktionen har varit en felkälla som påverkat resultatet. Kostnadsparametrarna har haft liten påverkan på resultatet eftersom terminalandelen var beroende av produktionsenheternas underkapacitet på vintern och överkapacitet på sommaren. Det är författarens bedömning att felkällorna har påverkat de slutsatser som dragits om terminalandelens numerära storlek. Däremot har de inte påverkat resonemanget om att det finns en ekonomisk besparing i att minska terminalandelen.

4.2.2 Terminalstruktur

Resultatet för terminalstruktur (kap. 3.3) har visat på mycket små skillnader mellan de olika terminalstrukturerna, 0,4 km (tabell 10) mellan scenario B och C. Studeras flödet mellan tillgångsnod och terminal (tabell 11) kan det inte urskiljas någon trend att fler terminaler skulle resultera i ett kortare transportavstånd från försäljningspunkt till terminal. Om terminalernas upptagningsområde var cirkulärt placerade runt om respektive terminal så borde det teoretiska transportavståndet sänkts med ca 30 % från scenario B (17 terminaler och hubbar) till scenario C (37 terminaler och hubbar). Att resultat i denna studie ej överensstämmer med den teoretiska potentialen beror främst på att upptagningsområden inte är cirkulärt placerad runt terminaler och hubbar utan ofta förskjutna till de områden där det inte fanns några mottagare (figur 14). Transportavståndet blir därför betydligt längre än vad fallet vore om terminalen var centralt placerad i upptagningsområdet.

Terminalstrukturen i referensscenariot hämtades från Södra Skogsenergis verkliga terminalstruktur och kan betraktas som strategisk. Den kan betraktas som strategisk eftersom placering av terminaler och lagringskapacitet per terminal var ett resultat av många års erfarenhet. Den strategisk placering gav ett kortare medeltransportavstånd på 1,3 km (tabell 10) jämfört med de systematiskt utplacerade terminalerna. Däremot blev inte det ekonomiska nettot högre för referensscenariot jämfört med scenario A, B och C, vilket berodde på en överflödig lagringskapacitet som har gett en hög årskostnaden. Om lagringskapaciteten hade varit densamma i referensscenariot som i scenario A, hade det ekonomiska nettot varit lika.

För Södra Skogsenergis terminaler har det inte kunnat påvisas någon kostnadsdifferentiering mellan stora och små terminaler. Därför har kostnaden i denna analys varit detsamma för att lagra flis på en stor terminal som på en liten terminal. Ställningstagandet går emot vad Söderström (2006) kommer fram till i sin rapport där han menar på att stora terminaler är billigare än små, en skillnad är att Söderström räknar med att sönderdela material på terminal vilket inte var fallet i detta arbete och kan därmed förklara skillnaden. Terminaler med låg lagringskapacitet har oftast en lägre utrustningsnivå (Eriksson, 2012). Detta kan vara ett strategiskt skäl som måste beaktas vid val av strategi för terminalstruktur, men som ej beaktats i denna studie. Framtida lagkrav på inmätning av skogsbränslen kan innebära att mätutrustning måste införskaffas till varje terminal. Ett sådant lagkrav gör att etablering av små terminaler utesluts då investeringskostnaden för mätutrustning i förhållande till omsatt volym är för hög.

De faktorer som haft störst påverkan på resultatet för terminalstruktur var transportpris och transportkapacitet. Skillnaden i transportprislistan mellan containerbil och flisbil var en felkälla. Om kostnaden varit lika stor för att transportera skogsflis med flisbil som med

containerbil skulle terminalerna hamnat närmre mottagarna. I den verkligheten fanns det för varje produktionsenhet ett efterföljande containerbilssystem med en transportkapacitet. I modellen har detta förenklats till ett containerbilssystem efter alla produktionsenheter, vilket var en annan felkälla. Det är författarens bedömning att felkällorna har haft liten påverkan på de slutsatser som dragits om antalet terminalers påverkan på medeltransportavstånd och transportkostnad.

4.2.3 Upptagningsområde

Resultatet visade att upptagningsområdets storlek (kap. 3.3) per terminal blev mindre desto fler terminaler som användes. Vid färre antal terminaler samlades upptagningsområdena ihop till de områden där det fanns få mottagare av skogsflis. Detta berodde på att det blev mer transporteffektivt att köra skogsflisen från dessa församlingar till terminal med containerbil och från terminalen med flisbil. Terminaler som var placerade i närheten av en större mottagare hade relativt litet upptagningsområden eller användes inte alls (figur 14). Detta berodde på att det var mer kostnadseffektivt att köra direktleveranser från skog till mottagare i dessa områden. Eftersom den största efterfrågan var vintertid så innebär detta att produktionsresurserna placerades nära mottagarna under vintern. De två terminaler som uppnådde maximal lagringskapacitet under bränslesäsong 2013/2014 och bränslesäsong 2014/2015 var båda placerade i områden med medelgod tillgång på råvara och utan mottagare med stor efterfrågan. Att transportera skogsflis från terminal till hubb som terminalflödena i figur 13 visar, var ett resultat av höga ingående lager i analysperioden. Eftersom det inte inträffar bränslesäsong 2013/2014 eller 2014/2015 så var detta ett flöde en följd av det höga ingående lagret.

Felkällor som har påverkat upptagningsområdenas storlek och placering var transportprislista, transportkapacitet och mottagningsplatser. Skillnaden i transportkostnad mellan flisbil, containerbil och huggbil har varit avgörande för att terminaler placerade långt från mottagare har haft ett högt utnyttjande. Transportkapaciteten för containerbil och huggbil var en viktig faktor för hur flöden planerats i verkligheten, något som inte har varit begränsande i denna analys vilket var en felkälla. Utelämnade mottagare till följd av begränsningen på en årsförbrukning av 15 GWh var en förutsättning som påverkat upptagningsområdenas placering. Det är författarens bedömning att felkällorna har haft marginell påverkan på de slutsatser som dragits om upptagningsområden.

4.3 Jämförelse med tidigare studier

Resultatet från terminalandel (kap. 4.2.1) visar på att 11 % av årsvolymen ska lagras på terminal vilket är i underkant på det intervall på 10 -25% som Andersson (2000) menar är vanligast förekommande. I studien av Gunnarsson et al. (2004) på Sydved energileveranser har den optimerade försörjningskedjan en terminalandel på 16 % inklusive säkerhetslager. Det optimala lagret i en studien av Eriksson & Björheden (1989) är 45 000 m³s skogsflis vilket motsvarar en terminalandel på 23 %. Av nämnda studier stämmer förutsättningarna i Gunnarsson et al. (2004) bäst in på de förutsättningar som använts i detta arbete. Detta arbete har påvisat en lägre terminalandel, vilket kan förklaras med att det i studien av Gunnarsson et al. (2004) behandlas flera sortiment och sönderdelning på terminal. Andersson (2000) redovisar att 6 månader är den genomsnittliga lagringslängden i praktisk tillämpning. I studien av Gunnarsson et al. (2004) visar resultatet att flis endast bör lagras på terminal från juni till november vilket är betydligt kortare period än de 6 månader som resultatet i denna studie visar (kap. 3.5). Största orsaken till skillnad är att det i studien av

Gunnarsson et al. (2004) användes terminalflisare och lösgrotssystem vilket gör det möjligt att förvara groten hel på terminal.

I en studie om regionala försörjningskedjor för bränsleved har resultatet visat att 19 av 38 möjliga terminaler användes i en optimal lösning och att 40 % av råvaran sönderdelades eller lagrades på terminal (Gronalt & Rauch, 2010). En känslighetsanalys på studiens resultat visade att terminalstrukturen var stabil med avseende på ändrad transportkostnad och ökad importvolym. Utifrån Gronalt & Rauchs resultat och resultatet av denna studie menar författaren på att en terminalstruktur med strategiskt placerade terminaler är stabil för kostnadsförändringar och utbudsvariation men påverkas av ändrade förutsättning för mottagare.

I resultatet av verifieringen (kap. 3.5) summeras lagringkostnaden på terminal och hubb till 40,1 kr/m³s vilket är i den övre delen av det intervall på 30 - 40 kr/m³s som Thörnqvist & Jirjis (1990) kom fram till för drygt tjugo år sedan. En anledning till att kostnaden hamnar i den övre delen av intervallet var att kostnad för båt- och tåglastning ingick i hanteringskostnaden. Produktionskostnaden som presenterats i kapitlet om verifiering (kap. 3.5) blev 75,3 kr/m³s vilket är inom det intervall på 72 – 84 kr/m³s som Athanassiadis et al. (2009) kommer fram till i sin rapport. Denna studie har visat att optimeringen av flöden genererar en potentiell sänkning av medeltransportavståndet med 25 %. Vilket ligger i paritet med de 29 % Flisberg et al. (2012) kommer fram till med samma modell och för ett liknande företag i samma geografiska område. Wittenström (2013) har i sin analys av lösgrot kommit fram till en potentiell sänkning av medeltransportavståndet med 17 %, dock användes det i den analysen enbart en terminal och en mottagare. Bergdahl et al. (2003) kommer till slutsatsen att transportkostnaderna kan sänkas med 8-9 % vid optimering av rundvirkesflöden i norra Sverige. Vid flödesoptimering är sänkningen av medeltransportavståndet högre för biobränsle än för rundvirke på grund av att antalet mottagare för biobränsle generellt sett är fler än för rundvirke. Det är därför svårt att göra jämförelser mellan rundvirke och biobränsle. Modeller för flödesoptimering tar inte tillräcklig hänsyn till de variationer i förutsättningar som förekommer i verkligheten vilket leder till en systematisk underskattning av medeltransportavståndet. Erfarenhetsmässigt brukar optimering av flöden sänka transportkostnaden med 10-15 % enligt Gunnarsson et al. (2001). Därför kan det antas att den sänkning av medeltransportavståndet på 25 % som denna studie kommit fram till har överskattat vad som borde vara en realistisk sänkning. Delmålet med denna studie har varit att jämföra hur olika terminalstrukturer påverkar transportkostnad och transportavstånd. Underskattningen av medeltransportavståndet har inte påverka de relativa skillnaderna i medeltransportavstånd mellan scenarierna. Utifrån resultatet av verifieringen (kap. 3.5) och jämförelsen med tidigare studier var det inte möjligt att förkasta modellen och den metod som har använts i detta examensarbete.

4.4 Fortsatta studier

En brist i detta arbete har varit den uteblivna känslighetsanalysen. Hur känsligt resultatet var för ändrade förutsättningar skulle vara intressant för framtida studier. Framförallt så var det två faktorer som bedömdes vara intressanta för en känslighetsanalys den första var produktionskapaciteten och den andra var efterfrågan hos mottagarna.

Denna studie bygger på en deterministisk optimeringsmodell vilken har en begränsad förmåga att optimera terminallagret utifrån den variation som finns inom skogsbränsle försörjning. För framtida studier så skulle en modell med stokastiska variationer bättre ta

hänsyn till de faktiska variationerna på produktionskapacitet och efterfrågan som förekommer i verkligheten.

Denna analys har visat att kostnaden för att lagra flis på terminal var 40 kr/m³s. Under redovisningen av arbetet för Södra Skogsenergi framkom spekulationer om att kontraktering av extra produktionsresurser vintertid kunde vara mer lönsamt än att lagra flis på terminal. Att undersöka var brytpunkten går för när det blir mer lönsamt att kontraktera extra produktionsresurser gentemot att lagra skogsflis på terminal var något som det efter denna studie fanns fortsatt behov av att utreda.

4.5 Slutsatser

- Minst 11 % av årsvolymen behövde lagras på terminal och hubb för att kunna tillgodose kundbehovet.
- Antalet terminaler hade mycket liten inverkan på medeltransportavståndet och transportekonomin.
- En strategisk placering av terminaler i områden med låg efterfrågan av skogsflis och där det fanns god tillgång på råvara gav ett kortare medeltransportavstånd.

Tillkännagivande

Jag vill tacka Mikael Frisk på Skogforsk som har hjälpt mig med flödesanalyser i beslutsstödet FlowOpt. Ett stort tack till alla på Södra Skogsenergi som har bistått mig med relevant data för examensarbetet och ett extra varmt tack till min bitr. handledare Sofia Persson för initiering av arbetet och givande diskussioner under arbetets gång. Tack även till Torbjörn Zilo som hjälpt mig med korrekturläsning och goda råd under arbetet.

Till slut vill jag rikta ett stort tack till min handledare Dimitris Athanassiadis för positiva kommentarer genom hela arbetet.

Referenslista

Skrifter

- Andersson, G. (2000). Technology of fuel chip production in Sweden. (*VTT Symposium*, 208). Juväskulä: VTT
- Asikainen, A. (2000). Cost factors of fuel chip production. (*VTT Symposium*, 208). Juväskulä: VTT
- Athanassiadis, D., Melin, Y., Lundström, A., Nordfjell, T. (2009). Marginalkostnader för skörd av grot och stubbar från förnygringsavverkning i Sverige. (*Arbetsrapport*, 261). Umeå: SLU Institutionen för skoglig resurshushållning
- Bergdahl, A., Örtendahl, A., Fjeld, D. (2003). The Economic Potential For Optimal Destination of Roundwood in North Sweden - Effects of Planning Horizon and Delivery Precision. *International Journal of Forest Engineering* 14,81-88
- Björheden, R. (2010a). Skogsbränsle, miljö och skogsproduktion. (*Skogen – En växande energikälla*). Uppsala: Skogforsk
- Björheden, R. (2010b). Sönderdelning och transport – nycklar till effektivare skogsbränslesystem. (*Skogen – En växande energikälla*). Uppsala: Skogforsk
- Björheden, R. & Eriksson, L.O. (1990). The Effects on Operational Planning of Changes in Energy Content of Stored Wood Fuels. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5, 255-261
- Egnell, G. (2009). Skogsskötselserien – 17. Skogsbränsle. Jönköping: Skogsstyrelsen
- Eliasson, L. (2010). System för hantering av grot. (*Skogen – En växande energikälla*). Uppsala: Skogforsk
- Enström, J., Barth, A., Winberg, P., Fogdestam, N., Berg, S. (2010). Inlandsbanans potential för Sveriges skogsbränsleförsörjning. (*Arbetsrapport*, 727). Uppsala: Skogforsk
- Engblom, G., (2007). Systemanalys av skogsbränsletransporter. (*Arbetsrapport*, 175) Umeå: SLU Institutionen för skoglig resurshushållning
- Eriksson, L.O. & Björheden, R. (1989). Optimal Storing, transport and processing for a forest-fuel supplier. *European Journal of Operational Research* 43, 26-33
- Flisberg, P., Frisk, M., Rönnqvist, M. (2012a). Alternative energy powers Sweden. *International O.R Insights* 39, 2
- Flisberg, P., Frisk, M., Rönnqvist, M. (2012b). FuelOpt: A decision support system for forest fuel logistics. *Journal of the Operational Research Society* 63, 1-13
- Forsberg, M., Frisk, M., Rönnqvist, M. (2005). FlowOpt: A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry. *International Journal of Forest Engineering* 2, 101-113
- Gold, S. & Seuring, S. (2011). Supply chain and logistics issue of bio-energy production *Journal of Cleaner Production* 19, 32-42
- Gronalt, M. & Rauch, P. (2007) Designing a regional forest fuel supply network. *Biomass and Bioenergy* 31, 393-402

- Gronalt, M. & Rauch, P. (2010) The Terminal Location Problem in the Forest Fuels Supply Network. *International Journal of Forest Engineering* 21(2)
- Gunnarsson, H., Lundgren, J., Rönnqvist, M. (2001). Optimering kan sänka produktionskostnaderna för skogsbränsle. (*Resultat*, 2001:16). Uppsala: Skogforsk
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., Lundgren, J. T. (2004). Supply chain modeling of forest fuel. *European Journal of Operational Research* 158, 103-123
- Jirjis, R., Lehtikangas, P., Oskarsson, R. (1993). Terminallagring av bränsleflis. *Vattenfall research* 21, 1-25
- Junginger, M., Faaij, A., Björheden, R., Turkenburg, W.C. (2005). Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 29, 399-418
- Lehtikangas, P. (1999). *Lagringshandbok för trädbränslen*. 2:a upplagan. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet
- Mattson, S.A. (2002). *Logistik i försörjningskedjor*. Lund: Studentlitteratur
- Nalin, E. (2008). Skogsbränslemarknaden – En inledande översikt. (*Examensarbete*, 2008). Växjö: Växjö universitet Avdelningen för teknik och design
- Nilsson, B. (2007). Skogsbränslehantering Effektivitet och kostnader för olika hanteringsmetoder för grotuttag. (*Examensarbete*, 2007). Växjö: Växjö universitet Avdelningen för skog och träteknik
- Nordfjell, T., Iwarsson Wide, M. (2010). Unga bestånd – en växande energikälla. (*Skogen – En växande energikälla*). Uppsala: Skogforsk
- Skogsstyrelsen (2012). *Skogsstatistisk årsbok 2011*. Jönköping: Skogsstyrelsen
- Söderström, J. (2006). Upparbetning av grot i semimobila terminaler. (*Samverkan för utveckling och förädling av regionens outnyttjade skogsresurser*). Sollefteå: Energidalen
- Thörnqvist, T., Jirjis, R. (1990). Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar. (*Rapport*, 219) Uppsala: SLU Institutionen för virkeslära
- Wittenström, A. (2013). Geografiska mönster av skogsbränsleflöden för Jämtlands län. (*Arbetsrapport*, 389) Umeå: SLU Institutionen för skoglig resurshushållning

Oppublicerat

Eriksson, U. (2012). Inventering bränsleterminaler 2011. SDC

Internet

- AMPL (2013). *AMPL Modeling Language for Mathematical Programming*. Tillgänglig: <http://www.ampl.com/> [2013-02-11]
- IBM (2013). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. Tillgänglig: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/> [2013-02-11]
- Energimyndigheten (2012). *Energimyndigheten – Energifrågan inom EU*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/sv/Internationellt/Internationellt-energisamarbete--/Energifragan-inom-EU/> [2012-11-29]

Energimyndigheten (2013). *Energikunskap – Förnybara energikällor*. Tillgänglig: <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Fornybar-energi/> [2013-01-25]

ESRI (2013). *ArcGIS – Mapping and Spatial Analysis for Understanding Our World*. Tillgänglig: <http://www.esri.com/software/arcgis> [2013-02-11]

Södra (2012a). *Om Södra – Södra*. Tillgänglig: <http://www.sodra.com/sv/Om-Sodra/> [2012-09-01]

Södra (2012b). *Södra Skog – Södra*. Tillgänglig: <http://www.sodra.com/sv/Om-Sodra/Vara-affarsomraden/Sodra-Skog/> [2012-09-01]

Södra (2012c). *Biobränsle – Södra*. Tillgänglig: <http://www.sodra.com/sv/Energi/Biobransle/> [2012-09-01]

Personlig kommuniké

Axmarker, J., (2012) Intervju [2012-09-07]

Andreasson, J.E., Carlsson, T., Paulson, F., (2012) Mejlkorrespondens [2012-09-10]

Eriksson, H., (2012) Mejlkorrespondens [2012-10-22]

Johansson, M., (2012) Intervju [2012-08-22]

Persson, S., (2012) Mejlkorrespondens [2012-09-13]

Svensson, J., (2012) Mejlkorrespondens [2012-08-30]

Andersson, A., (2013) Telefonsamtal [2013-01-08]

Bilaga A FlowOpt formler

Formler och uttryck har hämtats från Flisberg et al. (2012b) men har omarbetats för att passa problemet i detta examensarbete

Index

H: Sortiment index ($h = \text{Grot, Grotflis_flisare, Grotflis_huggbil, Skogsflis_terminal}$)

G: Sortimentegrupp index ($g = \text{Skogsflis}$)

T: Tidsperioder index ($t = 1, \dots, 36$)

I: Försörjningsytter index ($i = 1, \dots, 664$)

J: Mottagningsplatser index ($j = 1, \dots, 78$)

M: Terminaler för lagring index ($m = 1, \dots, 80$)

K: Lastbilssystem index ($k = 1, \dots, 8$, K^C : lastbilshugg)

N: Produktionsenhet index ($n = 1, \dots, 27$)

Parametrar tillgångsnod

S_{iht} : Tillgänglig volym av sortiment h vid punkt i för tidsperioden t

C_{iht} : Anskaffningskostnad för sortiment h vid punkt i för tidsperioden t

Parametrar för mottagningsplatser

D_{jgt} : Efterfrågad volym vid mottagare j av sortimentsgrupp g i tidsperiod t

p_{jg} : Försäljningspris av sortimentsgrupp g hos mottagare j

c_{jgt}^J : Lagringskostnad vid mottagare j av sortimentsgrupp g för tidsperiod t (används för hubb)

c_{jg}^{JHant} : Hanteringskostnad vid mottagare j för sortimentsgrupp g

u_{jt}^{J+} : Maximal lagernivå vid mottagare j för tidsperiod t (används för hubb)

Parametrar för terminaler

SO_{mgh}^M : Ingåendelager på terminal m för sortiment h och sortimentsgrupp g

c_{mht}^M : Lagerkostnad för terminal m och sortiment h för tidsperioden t

c_{mh}^{MLast} : Lastningskostnad vid terminal m för sortiment h

c_{mh}^{MLosn} : Stackningskostnad vid terminal m för sortiment h

u_{mht}^{M1+} : Maximal lagernivå för terminal m av sortiment h vid tidsperiod t

Parametrar för transport

d_{ij}^D : Transportavstånd mellan tillgångsnod i och mottagningsplats j

d_{im}^D : Transportavstånd mellan tillgångsnod i och terminal m

d_{mj}^D : Transportavstånd mellan terminal m och mottagningsplats j

c_{ijgh} : Transportkostnad för sortiment h i sortimentsgrupp g mellan tillgångsnod i och mottagningsplats j

c_{imgh} : Transportkostnad för sortiment h i sortimentsgrupp g mellan tillgångsnod i och terminal m

c_{mjgh} : Transportkostnad för sortiment h i sortimentsgrupp g mellan terminal m och mottagningsplats j

u_k^{KW} : Skalningsfaktor för transportarbete med avseende på transportsystem k

u_k^{KC} : Transportkapacitet för lastbilssystem k

Parametrar för lastbilshugg

u_{kt}^{CH} : Medelhastighet för lastbilshugg k i tidsperiod t

u_{kt}^{CW} : Medellast för lastbilshugg k i tidsperiod t

u_{kt}^{K+} : Maximalt antal arbetstimmar för lastbilshugg k i tidsperiod t

u_{kt}^{KA+} : Maximalt antal arbetstimmar för fordonsdel i lastbilshugg k i tidsperiod t

Parametrar för produktionsenhet

c_{hn}^f : Kostnad för sönderdelning av sortiment h med produktionsenhet n

f_{hn}^t : Produktivitet vid sönderdelning av sortiment h med produktionsenhet n

u_{nt}^{f+} : Maximal produktion för sönderdelning med produktionsenhet n i tidsperiod t

u_{nt}^{f-} : Minimal produktion för sönderdelning med produktionsenhet n i tidsperiod t

u_n^{f1+} : Maximal produktion för sönderdelning med produktionsenhet n över hela planperioden

u_n^{f1-} : Minimal produktion för sönderdelning med produktionsenhet n över hela planperioden

Beslutsvariabler

x_{ijght} : Flöde från tillgångsnod i till mottagare j av sortimentsgrupp g och sortiment h i tidsperiod t

x_{imght} : Flöde från tillgångsnod i till terminal m av sortimentsgrupp g och sortiment h i tidsperiod t

x_{mjght} : Flöde från terminal m till mottagare j av sortimentsgrupp g och sortiment h i tidsperiod t

b_{iht}^I : Köpta volymer av sortiment h vid tillgångsnod i över tidsperiod t

l_{iht}^{I1} : Lagervolym av ej köpt sortiment h vid tillgångsnod i över tidsperiod t

l_{iht}^{I2} : Lagervolym av köpta sortiment h vid tillgångsnod i över tidsperiod t

v_{ihnt}^{IT} : Flisad volym av sortiment h vid tillgångsnod i med produktionsenhet n och tidsperiod t

y_{jgt} : Levererad volym av sortimentsgrupp g till mottagare j i tidsperiod t

l_{jgt}^J : Lagervolym av sortiment g vid mottagare j i tidsperiod t

l_{mght}^M : Lagervolym av sortiment g och sortiment h vid terminal m i tidsperiod t

Stödparametrar

H_g^G : Sortiment som ingår i sortimentsgrupp g

H_k^K : Sortiment som kan fraktas med lastbilssystem k

N_k^C : Produktionsenhet som är kopplat med lastbilssystem k

N_{ihh}^I : Produktionsenhet som omvandlar sortiment h till sortiment h vid tillgångsnod i

R : Alla lastbilsflöden

Målformulering

$$\begin{aligned}
\max z = & \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} \sum_{t \in T} p_{jg} * y_{jgt} - \sum_{ijght \in R} c_{ijgh} * x_{ijght} - \sum_{imght \in R} c_{imggh} * x_{imght} \\
& - \sum_{mjght \in R} c_{mjgh} * x_{mjght} - \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} \sum_{t \in T} c_{jgt}^J * l_{jgt}^J \\
& - \sum_{m \in M} \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} c_{mgh}^M * l_{mgh}^M - \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{\bar{h} \in \bar{H}} \sum_{n \in N_{ih\bar{h}}^I} \sum_{t \in T} c_{h\bar{h}n}^f * v_{ihnt}^{IT} \\
& - \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} c_{iht} * b_{iht}^I - \sum_{imght \in R} c_{mgh}^{MLosn} * x_{imght} \\
& - \sum_{mjght \in R} c_{mgh}^{MLast} * x_{mjght} - \sum_{ijght \in R} c_{jg}^{JHant} * x_{ijght}
\end{aligned}$$

Bivillkor

Bivillkor 1. Styr maximal produktion för produktionsenhet n över hela planperioden

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{\bar{h} \in \bar{H}} \sum_{t \in T} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} \leq u_n^{f1+}$$

$\forall n \in N$

Bivillkor 2. Styr minimal produktion för produktionsenhet n över hela planperioden

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{\bar{h} \in \bar{H}} \sum_{t \in T} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} \geq u_n^{f1-}$$

$\forall n \in N$

Bivillkor 3. Styr maximal produktion per tidsperiod t för produktionsenhet n

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{\bar{h} \in \bar{H}} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} \leq u_{nt}^{f+}$$

$\forall n \in N, t \in T$

Bivillkor 4. Styr minimal produktion per tidsperiod t för produktionsenhet n

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} \sum_{\bar{h} \in \bar{H}} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} \geq u_{nt}^{f-}$$

$\forall n \in N, t \in T$

Bivillkor 5. Styr maximal arbetstid för lastbilshugg k per tidsperiod t

$$\begin{aligned} \sum_{(ijght) \in R: h \in H_k^K} \frac{u_k^{KW} * d_{ij}^D * x_{ijght}}{(u_{kt}^{CH} * u_{kt}^{CW})} + \sum_{(imght) \in R: h \in H_k^K} \frac{u_k^{KW} * d_{im}^D * x_{imght}}{(u_{kt}^{CH} * u_{kt}^{CW})} \\ + \sum_{i \in I} \sum_{h \in H_k^K} \sum_{\bar{h} \in H_k^K} \sum_{n \in N_k^C} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} \leq u_{kt}^{K+} \\ \forall k \in K^C, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 6. Styr maximal arbetstid för transport med fordonsdelen i lastbilshugg k per tidsperiod t

$$\begin{aligned} \sum_{(ijght) \in R: h \in H_k^K} \frac{u_k^{KW} * d_{ij}^D * x_{ijght}}{(u_{kt}^{CH} * u_{kt}^{CW})} + \sum_{(imght) \in R: h \in H_k^K} \frac{u_k^{KW} * d_{im}^D * x_{imght}}{(u_{kt}^{CH} * u_{kt}^{CW})} \leq u_{kt}^{KA+} \\ \forall k \in K^C, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 7. Styr maximal transportkapacitet för transportsystem k per tidsperiod t

$$\begin{aligned} \sum_{(ijght) \in R: h \in H_k^K} u_k^{KW} * d_{ij}^D * x_{ijght} + \sum_{(imght) \in R: h \in H_k^K} u_k^{KW} * d_{im}^D * x_{imght} \\ + \sum_{(mjght) \in R: h \in H_k^K} u_k^{KW} * d_{mj}^D * x_{mjght} \leq u_k^{KC} \\ \forall k \in K, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 8. Styr maximal kvantitet på terminal m per tidsperiod t

$$\begin{aligned} \sum_{g, h: (gght) \in P_m^T} l_{mght}^M \leq u_{mt}^{M1+} \\ \forall m \in M, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 9. Anger att levererad volym ska vara lika med efterfrågad volym hos mottagare j per tidsperiod t

$$\begin{aligned} y_{jgt} = D_{jgt} \\ \forall j \in J, g \in G, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 10. Styr maximal nivå på lager hos mottagare j per tidsperiod t

$$\begin{aligned} \sum_{g \in G} l_{jgt}^J \leq u_{jt}^{J+} \\ \forall j \in J, t \in T \end{aligned}$$

Bivillkor 11. Lagerbalans av obetalda volymer vid tillgångsnod i per tidsperiod t

$$S_{iht} + l_{ih(t-1)}^{I1} - b_{iht}^I - l_{iht}^{I1} = 0$$

$$\forall i \in I, h \in H, t \in T$$

Bivillkor 12. Lagerbalans av betalda volymer vid tillgångsnod i per tidsperiod t

$$b_{iht}^I + l_{ih(t-1)}^{I2} - \sum_{\bar{h} \in H_i^I} \sum_{n \in N_{ih\bar{h}}^I} v_{ihnt}^{IT} + \sum_{\bar{h} \in H_i^I} \sum_{n \in N_{ih\bar{h}}^I} f_{\bar{h}hn}^C * v_{ihnt}^{IT} - \sum_{j,g:(ight) \in R} x_{ijght} - l_{iht}^{I2} = 0$$

$$\forall i \in I, h \in H, t \in T$$

Bivillkor 13. Lagerbalans av volymer på terminal m per tidsperiod t

$$l_{mgh(t-1)}^M + \sum_{i:(imght) \in R} x_{imght} - \sum_{j:(mjght) \in R} x_{mjght} - l_{mjght}^M = 0$$

$$\forall m \in M, (ght) \in P_m^T$$

Bivillkor 14. Styr att volymen som produceras av produktionsenhet n med lastbilshugg k^C transporteras av transportdelen k med samma lastbilshugg k^C per tidsperiod t

$$\sum_{j,g:(ijght) \in R} x_{ijght} - \sum_{n \in N_k^C} \sum_{\bar{h} \in H} f_{h\bar{h}n}^t * v_{ihnt}^{IT} = 0$$

$$\forall i \in I, k \in K^C, h \in H_k^K, t \in T$$

Bivillkor 15. Lagerbalans av volymer hos mottagare j per tidsperiod t

$$l_{jg(t-1)}^J - l_{jgt}^J - y_{jgt} + \sum_{i:(ijght) \in R} x_{ijght} + \sum_{m:(mjght) \in R} x_{mjght} = 0$$

$$\forall j \in J, g \in G, t \in T$$